

**CARACTERIZACIÓN GLOBAL DE LA MODULACIÓN EN EL RÉGIMEN
ACOPLADO EN AMPLITUD DE UNA MATRIZ DE CRISTAL LÍQUIDO POR
TRANSMISIÓN MEDIANTE EL MODELO RETARDADOR-ROTOR**

CINDY JENNIFER CUEVAS CELY

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2016

**CARACTERIZACIÓN GLOBAL DE LA MODULACIÓN EN EL RÉGIMEN
ACOPLADO EN AMPLITUD DE UNA MATRIZ DE CRISTAL LÍQUIDO POR
TRANSMISIÓN MEDIANTE EL MODELO RETARDADOR-ROTOR**

CINDY JENNIFER CUEVAS CELY

Trabajo de Grado para Optar el Título de Ingeniera Electrónica

Director

CRISTIAN HERNANDO ACEVEDO CACERES

Dr. (c) en Ciencias Naturales-Física

Codirector

YEZID TORRES MORENO

Dr. Óptica y Tratamiento de la Señal

Codirector

OMAR JAVIER TÍJARO ROJAS

Dr. (c). en Ingeniería Electrónica

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA Y DE
TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA**

2016

DEDICATORIA

Dedico este trabajo primero que todo a Dios por darme la oportunidad de abrir mis ojos y recibir un nuevo día, por brindarme salud, fortaleza y sabiduría cuando estoy a punto de desfallecer.

A mi querida familia, por ser un pilar en momentos de ánimos caídos, por ser mi apoyo, mi soporte y tenerme siempre presente en sus oraciones.

A mis amigos por esos momentos de distracción, cuando era necesaria una pausa, por sus afectos, bromas y recuerdo agradables.

Especialmente lo dedico a Jazmín Barrera, por estar presente en casi todo este proceso conmigo, por ser mi motivadora personal y tener las palabras correctas en los momentos justos.

AGRADECIMIENTOS

A Dios, gracias por estar siempre presente y acompañarme en este proceso lleno de retos, aprendizajes y lecciones. Por abrir ventanas cuando las puertas se cerraban y poner en mi camino a las personas correctas para transitar este sendero.

Agradezco, al profesor Cristian Hernando Acevedo Cáceres, mi director, por su apoyo y confianza, su arduo trabajo, dedicación y enseñanzas transmitidas no solamente a nivel académico durante el desarrollo de este proyecto.

A mis codirectores, Yezid Torres Moreno y Omar Javier Tijero Rojas, por la colaboración académica, apoyo, disposición y acompañamiento a lo largo del proyecto.

Agradezco, también a todos los integrantes del grupo de investigación GOTS, por las sugerencias aportadas para la realización de este proyecto.

Finalmente, gracias a todas aquellas personas que de alguna u otra manera pusieron su granito de arena para la culminación de este proyecto.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN.....	20
1. GENERALIDADES DEL PROYECTO	22
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
1.2 JUSTIFICACIÓN	23
1.3 OBJETIVOS	24
1.3.1 Objetivo General.	24
1.3.2 Objetivos Específicos.....	24
1.4 ALCANCES.....	25
2. FUNDAMENTO TEÓRICO.....	26
2.1 DIRECCIONAMIENTO DE UNA MATRIZ DE CRISTAL LÍQUIDO	27
2.1.1 Direccionamiento por TFTs	28
2.1.2 Escala de Gris Los LCDs	30
2.2 CARACTERIZACIÓN DE UNA MATRIZ DE CRISTAL LÍQUIDO SIN VOLTAJE APLICADO....	31
2.2.1. Método de los parámetros de Stokes	35
2.3 CARATERIZACIÓN DE UNA MATRIZ DE CRISTAL LÍQUIDO CON VOLTAJE APLICADO	40
2.4 APLICACIONES DE LOS MODULADORES ESPACIALES DE LUZ EN LAS COMUNICACIONES.....	46
3. CARATERIZACIÓN DE UNA MATRIZ DE CRISTAL LIQUIDO MEDIANTE MODELO RETARDADOR-ROTOR.....	50
3.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FABRICACIÓN DEL TN-LCD. RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES EN AUSENCIA DE VOLTAJE.....	51
3.2 CARACTERIZACIÓN DEL TN-LCD SONY SIN DIFERENCIAS DE POTENCIAL APLICADO..	52
3.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UNA MATRIZ DE CRISTAL LÍQUIDO CON UNA DIFERENCIA DE POTENCIAL APLICADO.....	61
3.4 AJUSTE CONTRASTE Y BRILLO DE LA TN-LCD SONY.....	67
4. APLICACIÓN DE UNA MATRIZ DE CRISTAL LÍQUIDO EN LAS COMUNICACIONES	69
4.1 GENERACIÓN DE HOLOGRAMAS COMPUTARIZADOS EN FORMA DE TENEDOR.....	70

4.2 PRODUCCIÓN OPTOELECTRÓNICA DE HACES CON MOMENTO ANGULAR ORBITAL UTILIZANDO HOLOGRAMAS COMPUTARIZADOS.	71
4.3 SISTEMA OPTOELECTRÓNICO SENCILLO PARA LA CODIFICACIÓN DE DATOS SOBRE EL MOMENTO ANGULAR ORBITAL DE LA LUZ	73
5. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES	78
6. PRODUCTOS ASOCIADOS	80
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	83
BIBLIOGRAFÍA.....	90

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 Sistema de direccionamiento de una matriz activa. Fuente [39]. ...	28
Figura 2 Direccionamiento TFT de los pixeles en una fila. Fuente [40], modificado autor	28
Figura 3 Forma de onda del voltaje que atraviesa un pixel durante la carga y descarga del capacitor de almacenamiento. Fuente [40], modificado autor.	30
Figura 4 Forma de onda del voltaje que atraviesa un pixel durante la carga y descarga del capacitor de almacenamiento. Fuente [40], modificado autor.	31
Figura 5 Diagrama de los sistemas de referencia y ángulos involucrados en el método de Soutar y Lu. a) P, polarizador; LCD, dispositivo de cristal líquido y A, analizador. b) De izquierda a derecha se detalla el diagrama de ángulos para el polarizador y analizador, respectivamente.	34
Figura 6 Curvas teóricas para los parámetros de Stokes cuando se sustituye ΨD (línea roja) por $\Psi D + \pi/2$ (línea azul). a) Parámetro S1. b) Parámetro S2. c) Parámetro S3. d) Representación en la esfera de Poincaré.	37
Figura 7 Curvas teóricas para los parámetros de Stokes cuando se sustituye $\emptyset = \pi/2$ (línea roja) por $\emptyset = -\pi/2$ (línea azul). a) Parámetro S1. b) Parámetro S2. c) Parámetro S3. d) Representación en la esfera de Poincaré.	38

Figura 8 Intensidad asociada al estado de polarización que emerge del analizador cuando el ángulo de giro es, $\varnothing = \pi/2$ (línea roja) o $\varnothing = -\pi/2$ (línea azul).....	39
Figura 9 Orientación molecular en un TN-LCD($\varnothing = \pi/2$) en tres situaciones. a) En ausencia de potencial. b) Cuando se aplica una diferencia de potencial aproximadamente igual al potencial umbral. c) Cuando se aplica una diferencia de potencial muy intensa entre la cara de entrada y salida de la matriz.....	41
Figura 10 Orientación e inclinación molecular en un TN-LCD($\varnothing = \pi/2$), cuando se aplica una diferencia de potencial entre la cara de entrada y salida de la matriz.....	41
Figura 11 Relación entre transmitancia a la salida del TN-LCD en función del voltaje aplicado entre las capas de la matriz. Fuente [1] modificado autor	42
Figura 12 a) Acción de una lámina retardadora sobre un estado de polarización P. Los segmentos OF y OS representan, respectivamente, los ejes rápido y lento de la lámina y Q, el estado de polarización final. b) Acción de un rotor sobre un estado de polarización inicial P. El punto Q representa el estado de polarización final. Fuente [17, 45 – 47].....	43
Figura 13 Descripción en la esfera de Poincaré del efecto de una celda de TNLCD sobre luz circularmente polarizada. R y L representan, respectivamente, luz circular dextrógira y levógira. Los ángulos 2α y 2ε son	

las coordenadas esféricas (longitud y latitud) del estado de polarización final. Fuente [45 – 47]	44
Figura 14 Representación del Momento Angular Orbital con valores enteros bien definidos de izquierda a derecha $m=0$, 1, 3, y $m=5$, respectivamente (Arriba: Distribución de intensidad. Abajo: Representación de la fase) Fuente [55] modificado autor	48
Figura 15 Hologramas computarizados en amplitud para los valores de cargas topológicas: a) $m = 1$, b) $m = 2$, c) $m = 3$, d) $m = 4$, e) $m = 5$ y f) $m = 6$. Fuente [19]	49
Figura 16 a) esquema del TN–LCD, en el cual las partes claras y oscuras corresponden a las áreas con pixeles activos e inactivos de la matriz, respectivamente. b) fotografía del TN–LCD tanto macroscópica (arriba) como microscópica (abajo). Fuente [60 – 62], modificado autor	52
Figura 17 Montaje de laboratorio para registrar los datos obtenidos a través del método de Soutar–Lu. L, láser; O, objetivo; PH, pinhole; F1, apertura; L1, lente colimadora; P, polarizador; LCD, dispositivo de cristal líquido; A, analizador; L2, lente corregida de Fourier; F2, otra apertura y PM, medidor de potencia.	53
Figura 18 Gráficas experimentales de intensidad luminosa obtenidas para la configuración paralela y cruzada, respectivamente.	54
Figura 19 Resultados obtenidos para los cocientes entre las configuraciones cruzada y paralela, experimental y teóricamente respectivamente.	55

Figura 20 Resultados experimentales (línea roja) y teóricos para los cocientes entre las configuraciones cruzada y paralela.....	56
Figura 21 Resultados experimentales (línea roja) y teóricos (línea azul) para las configuraciones paralela y cruzada, respectivamente.	57
Figura 22 Montaje de experimental para la medida de los parámetros de Stokes. L1, es la lente colimadora; P, el polarizador; LCD, el dispositivo de cristal líquido; QWP, la lámina de $\lambda/4$ que se emplea en la medida de S_3 y A, el analizador.	58
Figura 23 Resultados experimentales (línea azul) de S_1 , S_2 y S_3 ; y analíticos para los parámetros de Stokes con los dos posibles valores angulares de eje molecular. (Primera fila) valor analítico de $\psi_D = 75.1^\circ$ valor analítico de (segunda fila) $\psi_D = -14.9^\circ$	59
Figura 24 Resultados experimentales (línea azul) de S_1 , S_2 y S_3 ; y analíticos para los parámetros de Stokes con los dos posibles valores angulares de giro molecular. (Primera fila) valor analítico de $\phi = +93.8^\circ$ (segunda fila) valor analítico de $\phi = -93.8^\circ$	60
Figura 25 Montaje realizado en el laboratorio para la medida de los parámetros característicos. L es el láser; O, el objetivo; PH, el pinhole; F1, es una apertura; L1, la lente colimadora; P es el polarizador; QWP1, una lámina de cuarto de onda con su eje rápido orientado a 45° con respecto al eje de transmisión del polarizador; LCD, dispositivo cristal líquido; QWP2, la lámina	

de cuarto de onda utilizada para la medida S_3 ; A, el analizador; L2, la lente corregida de Fourier; F2, otra apertura y PM, el medidor de potencia.	63
Figura 26 Resultados experimentales para los parámetros de Stokes S_1, S_2 y S_3 de la transmisión de luz polarizada circularmente el en TN-LCD en función de cada nivel de gris g aplicado.	64
Figura 27 Resultados experimentales (línea azul) y ajuste no lineal (curva teórica, línea roja) para hallar ϕ_{eq} y δ_{eq} en el nivel de gris $g = 0$	66
Figura 28 Resultados experimentales finales de ϕ_{eq} y δ_{eq} en función del nivel de gris aplicado sobre el TN-LCD.	67
Figura 29 Distribución experimental de la curva de brillo (1.298 [V]) para la operación de la LCD. Potencia promedio vs niveles de grises y barras de residuales.	68
Figura 30 Hologramas generados por Matlab [®] para las cargas topológicas de izquierda a derecha $m=5, 20$ y $m=30$. (Primera fila con niveles de grises $g = 153, g = 163$ y $g = 173$. Segunda Fila con niveles de grises de 0-255). .	70
Figura 31 Generador optoelectrónico de haces con momento angular orbital. L, láser; O, objetivo; PH, pinhole; F1, apertura; L1, lente colimadora; P, polarizador; LCD, dispositivo de cristal líquido o modulador espacial. Fuente [17- 23], modificado Autor.	71
Figura 32 Resultados experimentales obtenidos para la generación de haces con momento angular orbital para las cargas topológicas de izquierda a	

derecha $m=5$, 20 y $m=30$. (Primera fila con niveles de grises $g=153$, $g =163$ y $g=173$. Segunda Fila con niveles de grises de 0–255).....	72
Figura 33 Radio promedio de la intensidad del modo experimental con MAO $m=20$	73
Figura 34 a) distribución de intensidad de un vórtice óptico analítico con carga topológica $m=20$. b) Perfil de la simulación teórica de la intensidad y radio del modo teórico con MAO $m=20$	74
Figura 35 Montaje experimental para la transferencia de datos codificados sobre el MAO entero definido. L, láser; O, objetivo; PH, pinhole; F1, apertura; L1, lente colimadora; P, polarizador; LCD, dispositivo de cristal líquido o modulador espacial; A, analizador; L2, lente corregida de Fourier; F2, otra apertura y CCD, cámara monocromática. Fuente [17, 23], modificado Autor.	77
Figura 36 Presentación poster Congreso II CCEQ y 2°SNN 2016 Octubre 2016, Bucaramanga, Colombia.....	82
Figura 37 Esquema de los diferentes sistemas de referencia usados en la deducción de la matriz de Jones en ausencia de voltaje externo para un TN-LCD.	98
Figura 38 Curva experimental para la intensidad asociada al campo de salida del TN-LCD.	104
Figura 39 Resultados experimentales (línea roja) de la intensidad de salida del TN-LCD; y analíticos (línea azul) para los dos posibles valores angulares	

de giro molecular. a) valor analítico de $\varnothing = +93.8^\circ$. b) valor analítico de $\varnothing = -93.8^\circ$	105
Figura 40 Resultados experimentales (línea azul) y ajuste no lineal (curva teórica, línea roja) para hallar \varnothing_{eq} y δ_{eq} en los niveles de gris (de izquierda a derecha) 2, 3, 4, 5, y 7 respectivamente	106
Figura 41 Resultados experimentales (línea azul) y ajuste no lineal (curva teórica, línea roja) para hallar \varnothing_{eq} y δ_{eq} en el nivel de gris $g = 157$	109
Figura 42 Imágenes experimentales de la difracción de campo lejano para las cargas topológica desde $m=0$ a $m=40$	110

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Especificaciones del panel LCD. Fuente [59, 60]	51
Tabla 2 Resultados de los parámetros físicos del TNLCD utilizando el método de Soutar-Lu.....	57
Tabla 3 Resultados finales de los parámetros físicos del TN-LCD.....	61
Tabla 4 Resultados de los radios promedio experimentales y teóricos. Cálculo de la desviación entre el valor medido y el valor teórico.....	75
Tabla 5 Asignación del alfabeto sobre los momentos angulares orbitales.	76
Tabla 6 Valores de ϕ_{eq} y δ_{eq} para los seis restantes niveles de grises.....	107
Tabla 7 Valores de ϕ_{eq} y δ_{eq} para el nivel de gris $g = 157$ aplicando polarización lineal y/o circular, respectivamente.....	109

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. DEDUCCIÓN DE LA TRANSMITANCIA DE LA CONFIGURACIÓN PERPENDICULAR Y PARALELA	98
ANEXO B. DEDUCCIÓN MODELO RETARDADOR-ROTOR PARA UN TN-LCD CON VOLTAJE APLICADO.	101
ANEXO C. PROCEDIMIENTO ADICIONAL PARA ENCONTRAR EL SIGNO DEL ÁNGULO DE GIRO.....	104
ANEXO D. VALORES DE φ_{eq} Y δ_{eq} PARA LOS SEIS RESTANTES NIVELES DE GRISES.....	106
ANEXO E. COMPARACIÓN DEL RESULTADO DE LOS VALORES DE φ_{eq} Y δ_{eq} UTILIZANDO EL MÉTODO DE ILUMINACIÓN DEL TN-LCD CON UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA CON POLARIZACIÓN LINEAL RESPECTO DEL MÉTODO DE ILUMINACIÓN DEL TN-LCD CON UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA CON POLARIZACIÓN CIRCULAR PARA UN NIVEL DE GRIS $g = 157$	108
ANEXO F. COLECCIÓN DE VÓRTICES ÓPTICOS OBTENIDOS UTILIZANDO LOS HOLOGRAMAS MEJORADOS CON LOS NIVELES GRISES $g = 153$, $g = 163$ Y $g = 173$ DESPLEGADOS SOBRE TN-LCD SONY PARA VALORES DE CARGA TOPOLÓGICA DESDE $m = 0$ A $m = 40$	110

RESUMEN

TÍTULO: CARACTERIZACIÓN GLOBAL DE LA MODULACIÓN EN EL RÉGIMEN ACOPLADO EN AMPLITUD DE UNA MATRIZ DE CRISTAL LÍQUIDO POR TRANSMISIÓN MEDIANTE EL MODELO RETARDADOR-ROTOR*

AUTORES: CINDY JENNIFER CUEVAS CELY **

PALABRAS CLAVE: Matriz de cristal líquido, Modulador espacial de luz, Método Soutar y Lu, Parámetros de Stokes, Modelo Retardador-Rotor, Momento Angular Orbital de la Luz, Carga topológica, Codificación de datos.

DESCRIPCIÓN:

Una matriz de cristal líquido (LCD) es un dispositivo que utiliza una sustancia que se encuentra entre un estado líquido y sólido, manifestando las propiedades de ambos. Debido a esta característica, una de las principales aplicaciones de las matrices de cristal líquido es su uso como modulador espacial de luz (SLM). En el presente trabajo se muestran los resultados experimentales y teóricos de la caracterización de una LCD en fase nemática por transmisión Sony LCX038ARA para los parámetros ángulo de giro molecular, birrefringencia y ángulo del eje molecular de las caras de la matriz, utilizando el modelo retardador-rotor cuando la diferencia de potencial aplicada entre las caras de la LCD tienen un valor nulo. Además se muestran y analizan los resultados experimentales obtenidos para la caracterización del ángulo de giro molecular y la birrefringencia cuando la diferencia de potencial aplicado entre las caras de la LCD es diferente de cero.

Finalmente utilizando los valores de los parámetros encontrados anteriormente se mejoró significativamente la respuesta del modulador espacial de luz en el régimen acoplado en amplitud para implementar un sistema optoelectrónico para codificación de datos utilizando el momento angular orbital de la luz MAO. Ya que para generar haces con momento angular orbital se utilizan hologramas en forma de tenedor, generados por computador y escritos sobre un SLM.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físico - Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E³T), Director Dr. (c) Cristian Hernando Acevedo Cáceres, Codirector Dr. Yezid Torres Moreno, Codirector Dr. (c) Omar Javier Tíjaro Rojas.

ABSTRACT

TITLE: GLOBAL CHARACTERIZATION FOR A NEMATIC LIQUID CRYSTAL DISPLAY LCX038ARA USING THE RETARDER-ROTOR MODEL IN THE MODULATION AMPLITUDE-COUPLED REGIME*

AUTORES: CINDY JENNIFER CUEVAS CELY**

KEY WORDS: Liquid Crystal Display, Spatial Light Modulator, Soutar and Lu Method, Stokes Parameters, Retarder-Rotor Model, Orbital Angular Momentum of Light, Topological Charge, Encoding Data.

DESCRIPTION:

Liquid crystal displays LCDs, are electronic devices contains a material that exhibits liquid/solid properties sandwiches between two transparent electrodes. The unique properties of the LCDs make them attractive for applications such as spatial light modulators SLM. Most SLMs are in nematic phase and its properties can be explained by optics, electronics and materials science. According to the particular helical structure of each spatial light modulators, they can have some slight differences in the parameters like molecular twist angle, birefringence and angle of the molecular axis. In this work, we show experimental and theoretical results of the characterization of a nematic LCD Sony LCX038ARA for the parameters angle of molecular rotation, the birefringence and the angle of the molecular axis, using the retarder-rotor model. In addition, we analyze the experimental results obtained for the angle of molecular rotation and birefringence using a difference of voltage different to zero applied to SLM.

Finally using the parameter values found above, spatial light modulators response it got better improved in the coupled amplitude regime searching to implement an optoelectronic device for encoding data based orbital angular momentum MAO of light. Because to generate MAO beams with holograms generated by computer HGC, computer-generated forks are used.

* End pre-graduate work.

** Physical-Mechanical Engineering Faculty. Electrical, Electronics and Telecommunications (E³T) Engineering School, Director Dr. (c) Cristian Hernando Acevedo Cáceres, Codirector Dr. Yezid Torres Moreno, Codirector Dr. (c) Omar Javier Tíjaro Rojas.

INTRODUCCIÓN

Una matriz de cristal líquido (LCD) es un dispositivo que utiliza una sustancia que se encuentra entre un estado líquido y sólido, manifestando las propiedades de ambos [1]. Debido a ésta peculiaridad es posible manipular el frente de onda de un haz incidente sobre ella, y por tanto una de las principales aplicaciones de las LCD es su uso como modulador espacial de luz (SLM), los cuales son ampliamente utilizados en aplicaciones tales como: comunicaciones [2-5], manipulación de materia [6-8] entre otras [9-10]. La mayoría de los SLM están en fase nemática. Éstos se caracterizan porque cada capa de moléculas que conforman la matriz se encuentran dirigidas en una misma orientación angular aunque en posiciones aleatorias. Además, si la orientación angular aumenta o disminuye a medida que se va en dirección desde la primera capa a la última capa, entonces la LCD recibe el nombre de matriz helicoidal nemática [1, 11, 12].

Para describir el comportamiento de una matriz helicoidal nemática (TN-LCD por su abreviatura en inglés), es necesario conocer el valor de los parámetros: ángulo de giro molecular (ϕ), ángulo del eje molecular de la cara de entrada (Ψ_D), y valor de la birrefringencia máxima (β_{max}). Estos tres parámetros pueden depender o no de la diferencia de potencial aplicada al SLM [13]. El parámetro de birrefringencia (β) se define como [14-16]:

$$\beta = \frac{\pi}{\lambda}(n_e - n_o)d, \quad (1)$$

donde λ es la longitud de onda, n_e y n_o son los índices de refracción extraordinario y ordinario de la LCD, respectivamente y d es el espesor de la matriz. De manera que β puede ser interpretado como el retardo inherente adquirido por el frente de

onda al atravesar el TN-LCD [17]. Tanto β como ϕ son parámetros que poseen generalmente una dependencia no lineal en función de la diferencia de potencial aplicada al TN-LCD.

Por otra parte el momento angular orbital de la luz (MAO) es una propiedad física presente en la dinámica rotacional del frente de onda del campo electromagnético de un haz [18]. El momento angular orbital de un haz luminoso está referido a su estructura de fase de campo electromagnético. Haces luminosos con un factor de fase azimutal $e^{im\theta}$ poseen momento angular bien definido m , siendo m un valor entero [19]. Los haces luminosos con momento angular orbital pueden ser generados utilizando máscaras holográficas con diferentes valores de m , y desplegarse dinámicamente empleando un modulador espacial de luz por transmisión [20 - 23].

En el presente trabajo de investigación se utilizó el modelo Retardador-Rotor que se basa en el Método de Soutar y Lu [16, 24, 25] combinado con los parámetros de Stokes [17, 26] con el propósito de encontrar experimentalmente los valores de ángulo de giro molecular y birrefringencia para una diferencia de potencial cero y también diferente de cero aplicada a un SLM modelo Sony LCX038ARA. Además, utilizando el mismo modelo de Soutar y Lu se determinó experimentalmente el valor absoluto del ángulo de giro molecular de la cara de entrada, mientras que utilizando los parámetros de Stokes se encontró el signo asociado al ángulo de giro molecular. Finalmente, utilizando los valores de los parámetros encontrados anteriormente se mejoró la respuesta del SLM en el régimen acoplado en amplitud con el fin de poder modelar un sistema optoelectrónico para la codificación de datos utilizando el momento angular orbital de la luz.

1. GENERALIDADES DEL PROYECTO.

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

Los estudios realizados con los moduladores de luz nemáticos helicoidales por transmisión, han permitido avances en investigaciones y aplicaciones en los campos de comunicaciones [27 - 29], medicina [30, 31], biología [32, 33] y holografía [34, 35]. La implementación de las anteriores aplicaciones mencionadas requiere una previa caracterización de los moduladores espaciales de luz con el propósito de mejorar los resultados experimentales obtenidos a través de éstos.

Los moduladores de luz nemáticos helicoidales por transmisión basados en una matriz de cristal líquido presentan diferencias entre una misma referencia y modelo en los parámetros característicos ángulo de giro molecular (ϕ), birrefringencia (β) y ángulo del eje molecular (ψ_D), debido a pequeñas diferencias en la orientación angular dentro de la estructura helicoidal que posee cada uno de ellos al momento de su fabricación.

Por otro lado, uno de los principales métodos de generación de haces con momento angular orbital consiste en utilizar moduladores espaciales de luz por transmisión con el objetivo de generar y desplegar dinámicamente máscaras holográficas con un valor bien definido de fase azimutal, con alta eficiencia en los valores de difracción y pureza de los modos MAO obtenidos.

De acuerdo a todo lo anterior el presente trabajo de investigación se centra en la caracterización de un LCD modelo Sony LCX038ARA por transmisión mediante el modelo retardador-rotor con ausencia y presencia de voltaje entre los electrodos transparentes, con el propósito de encontrar los parámetros ángulo de giro molecular (ϕ), birrefringencia (β) y ángulo del eje molecular (ψ_D) adecuados para realizar un modelamiento óptimo de un sistema optoelectrónico para la codificación de datos usando el momento angular orbital de la luz.

1.2 JUSTIFICACIÓN.

En la generación de haces luminosos con momento angular orbital, usualmente se utiliza una matriz de cristal líquido para la generación dinámica de hologramas computarizados in situ. Los hologramas computarizados constituyen una componente fundamental del multiplexado de información, usando el momento angular orbital de un haz de luz. Por lo anterior, se requiere una caracterización global de la modulación en intensidad de la matriz con el fin de obtener los parámetros característicos: ángulo de giro molecular (ϕ), birrefringencia (β) y ángulo del eje molecular (ψ_D), que permitan mejorar su operación en el régimen acoplado en amplitud, y con ella la generación de dichos haces con momento angular orbital, con el propósito de su posterior implementación en el modelamiento de un sistema optoelectrónico para codificación de datos.

1.3 OBJETIVOS.

1.3.1 Objetivo General Caracterizar globalmente, la modulación en el régimen acoplado en amplitud de una matriz de cristal líquido por transmisión SONY modelo LCX038ARA mediante el modelo retardador-rotor, con el propósito de modelar un sistema optoelectrónico para la codificación de datos usando momento angular orbital de la luz.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Determinar experimentalmente el valor absoluto y signo del parámetro ángulo del eje molecular (Ψ_D) de la matriz de cristal líquido SONY modelo LCX038ARA.
- Determinar experimentalmente los parámetros ángulo de giro molecular (ϕ) y birrefringencia (β) de la matriz de cristal líquido nemática SONY modelo LCX038ARA, para valores definidos de potencial eléctrico aplicado.
- Implementar un montaje experimental para la generación de vórtices ópticos luminosos con momento angular orbital utilizando la matriz de cristal líquido SONY modelo LCX038ARA.
- Implementar un sistema optoelectrónico sencillo para verificar la codificación de datos sobre el momento angular orbital la luz.

1.4 ALCANCES.

De acuerdo con la estructura helicoidal de cada SLM, pueden existir ligeras diferencias, al momento de su fabricación, entre una misma referencia y modelo en los parámetros: ángulo de giro molecular, birrefringencia y ángulo del eje molecular. Por tanto se caracterizó en el régimen acoplado en amplitud una matriz de cristal líquido, SONY modelo LCX038ARA mediante el modelo retardador-rotor, con el fin de implementar un sistema optoelectrónico para la codificación de datos usando momento angular orbital de la luz.

2. FUNDAMENTO TEÓRICO.

La mayoría de los TN-LCD son ampliamente usados para cambiar las características electroópticas en fase y amplitud de un haz luminoso incidente sobre estos, es decir los TN-LCD son piedra angular de los moduladores espaciales de luz [13, 36]. No obstante para algunos modelos y referencias de TN-LCD especialmente los de bajo costo¹ pueden existir algunas dificultades debido a la carencia de información relevante sobre los parámetros electroópticos que caracterizan la estructura helicoidal de las capas de la matriz, como son el giro molecular, la birrefringencia del material y la orientación de las moléculas en la cara de entrada del dispositivo en ausencia de voltaje [17]. Estos últimos parámetros son de gran importancia para mejorar la utilización de los TN-LCD en el modo de amplitud acoplada en las aplicaciones mencionadas en el planteamiento del problema.

Este capítulo tiene como propósito mostrar los fundamentos electroópticos necesarios para caracterizar un TN-LCD con una diferencia de potencial cero y con una diferencia de potencial distinta de cero en el modo acoplado en amplitud, es decir maximizando su respuesta en intensidad y minimizando su respuesta en fase. Además de mostrar el momento angular orbital de una onda electromagnética y su generación usando los TN-LCDs. De acuerdo a lo anterior se ha dividido el capítulo en secciones. En la sección 2.1 se muestran las características electrónicas esenciales para el funcionamiento de un TN-LCD. En la sección 2.2 se muestra y detalla el método de Soutar y Lu para caracterizar la matriz nemática en ausencia de potencial, la sección 2.3 describe el procedimiento necesario para caracterizar un TN-LCD con una diferencia de potencial distinta de cero y finalmente la sección

¹ TN-LCDs de bajo costo que no superan los 300 dólares aproximadamente 900.000 cop.

2.4 muestra el fundamento teórico necesario para la aplicación de los TN-LCDs en las comunicaciones, es decir para generar haces luminosos con momento angular orbital, usados en la codificación de información en una base numérica distinta a la binaria, qubits.

2.1 DIRECCIONAMIENTO DE UNA MATRIZ DE CRISTAL LÍQUIDO.

Las LCDs se pueden subdividir en dos grupos, dependiendo de cómo se direccionen los píxeles individuales, de esto se deriva dos tipos de direccionamiento:

Direccionamiento por matriz pasiva Consiste en una serie de filas de electrodos situados por encima y debajo de la capa LCD. Ésta se excita aplicando una tensión en la intersección de los electrodos, es decir se excita una fila y una columna de la LCD y se activa el pixel que se encuentra en este cruce. Tiene la desventaja que al incrementarse la cantidad de filas y columnas, se crea un efecto campo, activando parcialmente los píxeles circundantes a uno activo, creando un efecto de imagen fantasma [37].

Direccionamiento por matriz activa: Está compuesto por transistores llamados transistores de filamento delgado o en inglés *thin film transistors* (TFT). Son pequeños transistores y condensadores que trabajan en forma de matriz en un sustrato de vidrio. En ésta matriz los TFTs se pueden activar individualmente, provocando el efecto Freedericksz [38] en cada píxel sin afectar a los demás píxeles (véase figura 1). Este tipo de matrices no sufren las limitaciones de las pasivas (efecto fantasma), pero requieren una retroiluminación mayor ya que el TFT no es muy transparente [37].

Los pixeles conmutados cargan N filas en un periodo de tiempo T_f en donde la imagen es guardada. Por lo tanto, el tiempo que tarda en enviar la señal de direccionamiento de N filas, T_r es:

$$T_r = \frac{T_f}{N}. \quad (2)$$

En el tiempo T_r , el periodo de carga T_{on} descrito en la figura 3 de los capacitores es:

$$T_{on} = (C_{LC} + C_S)R_{on} \leq 0.1T_r = 0.1\frac{T_f}{N}, \quad (3)$$

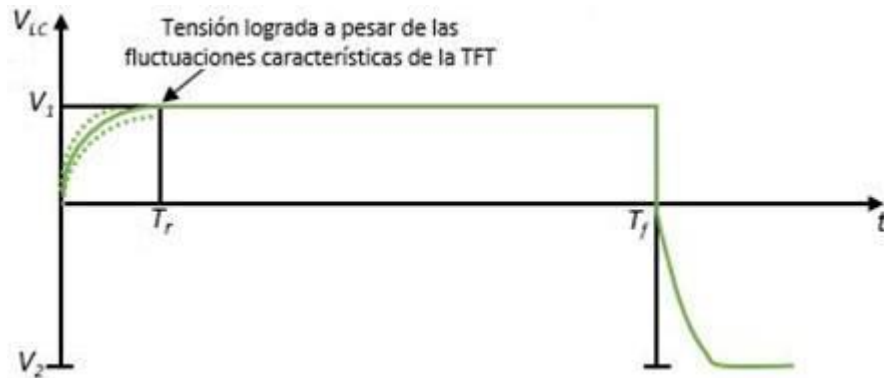
donde R_{on} es la resistencia de encendido del TFT [40].

El periodo de descarga T_{off} descrito en la figura 3 se encuentra limitado por la siguiente expresión:

$$T_{off} = (C_{LC} + C_S)R_{off} \geq 200T_f, \quad (4)$$

siendo R_{off} la resistencia de apagado que tiene el transistor a pesar de estar bloqueado [40].

Figura 3. Forma de onda del voltaje que atraviesa un pixel durante la carga y descarga del capacitor de almacenamiento. Fuente [40], modificado autor.

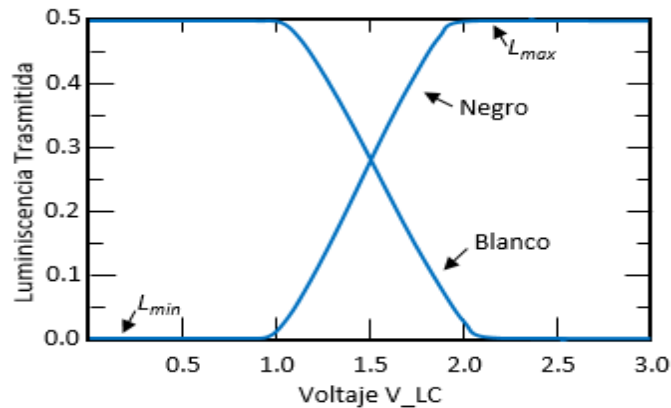


2.1.2 Escala de Gris Los LCDs usan dispositivos de carga acoplada CCDs o sensores semiconductores complementarios de óxido metálico CMOS que recogen la luz incidente de la imagen original. Luego, por medio del efecto fotoeléctrico, la energía de los fotones de la luz es transmitida a los electrones en el metal emisor que se encuentra en la CCD o en el sensor CMOS. La energía que los electrones absorben de los fotones, permiten que estos se muevan ($K = h\nu - \phi$, energía cinética de los electrones dada por la ecuación del efecto fotoeléctrico, donde ϕ es la función trabajo requerida para que el electrón escape del metal emisor), lo cual es posible si los fotones poseen la energía suficiente a través de la ecuación de Planck ($E = h\nu$, siendo ν la frecuencia necesaria para proveer la suficiente energía), para que los electrones escapen a la superficie del metal y generen corriente [39].

La escala o nivel de gris está definida por la parte lineal de la curva mostrada en la figura 4 que representa la luminiscencia transmitida versus el voltaje V_{LC} que atraviesa la celda del LCD. Asumiendo que la porción lineal de la figura 4 pertenece a una oscilación de 2V, luego para el uso común de 8-bit se produce una codificación

de $2^8 = 256$ niveles, donde cada nivel es separado por solo 0,0078V, el cual produce una escala de gris muy fina [39].

Figura 4. Forma de onda del voltaje que atraviesa un pixel durante la carga y descarga del capacitor de almacenamiento. Fuente [40], modificado autor.



2.2 CARACTERIZACIÓN DE UNA MATRIZ DE CRISTAL LÍQUIDO SIN VOLTAJE APLICADO.

Para caracterizar el comportamiento de una TN-LCD sin diferencia de potencial aplicada es necesario llevar a cabo un procedimiento de ingeniería inversa para encontrar el valor en magnitud y dirección de los parámetros ángulo de giro molecular, ángulo del eje molecular y birrefringencia. La magnitud de los tres anteriores parámetros puede determinarse a través del método propuesto por Soutar y Lu² [41]. Este método consiste en situar la TN-LCD (desconectada) entre dos polarizadores lineales, cuyos ejes de transmisión son cambiados simultáneamente manteniendo siempre la orientación paralela o perpendicular entre

² El Método de Soutar y Lu se puede considerar un procedimiento estándar para la caracterización de láminas retardadoras [41].

ellos [16, 17]. La TNLCD es asumida sin campo como un elemento volumétrico compuesto de capas, en el cual cada capa posee todas sus moléculas alineadas en una determinada dirección.

En el procedimiento de Soutar y Lu con la matriz insertada en medio de dos polarizadores lineales como se muestra en la figura 5. a) puede ser llevado a cabo en los pasos descritos a continuación [16, 24, 25]:

1. Ajustar el polarizador y analizador en perpendicular³ es decir con los ángulos $\zeta_1 = \zeta_2 + \pi/2$, respecto del plano coordenado XY del diagrama de la figura 5.a.
2. Girar el polarizador y el analizador en la misma dirección entre 0° y 360° a pasos bien definidos por la resolución angular del sistema medidor, tomando lecturas de la potencia electromagnética por unidad de tiempo. (Intensidad o transmitancia) con un sensor de potencia. Este arreglo experimental puede ser llamado configuración perpendicular.
3. Ajustar el polarizador y analizador en paralelo, es decir con los ángulos $\zeta_1 = \zeta_2$, respecto del plano coordenado XY en el diagrama de la figura 5.a.
4. Girar el polarizador y el analizador en la misma dirección entre 0° y 360° a pasos bien definidos por la resolución angular del sistema medidor, tomando lecturas de la potencia electromagnética por unidad de tiempo (Intensidad o transmitancia) con un sensor de potencia. Este arreglo experimental puede ser llamado configuración paralela.
5. Utilizar una regresión no lineal para evaluar los datos capturados en los dos primeros pasos y la expresión analítica de la transmitancia de la configuración perpendicular de la ecuación (5) (Ver deducción anexo A), para

³ De izquierda a derecha polarizador y analizador respectivamente.

encontrar una relación matemática entre las magnitudes del ángulo de giro molecular y el ángulo del eje molecular.

$$T_c = \left[-\cos\gamma \sin\emptyset + \frac{\emptyset}{\gamma} \sin\gamma \cos\emptyset \right]^2 + \left[\frac{\beta}{\gamma} \sin\gamma \sin(2\zeta_1 - \emptyset - 2\Psi_D) \right]^2. \quad (5)$$

6. Encontrar el cociente entre las expresiones analíticas de la transmitancia de la configuración perpendicular y paralela (ecuación de abajo) en función del desplazamiento angular ζ_1 .

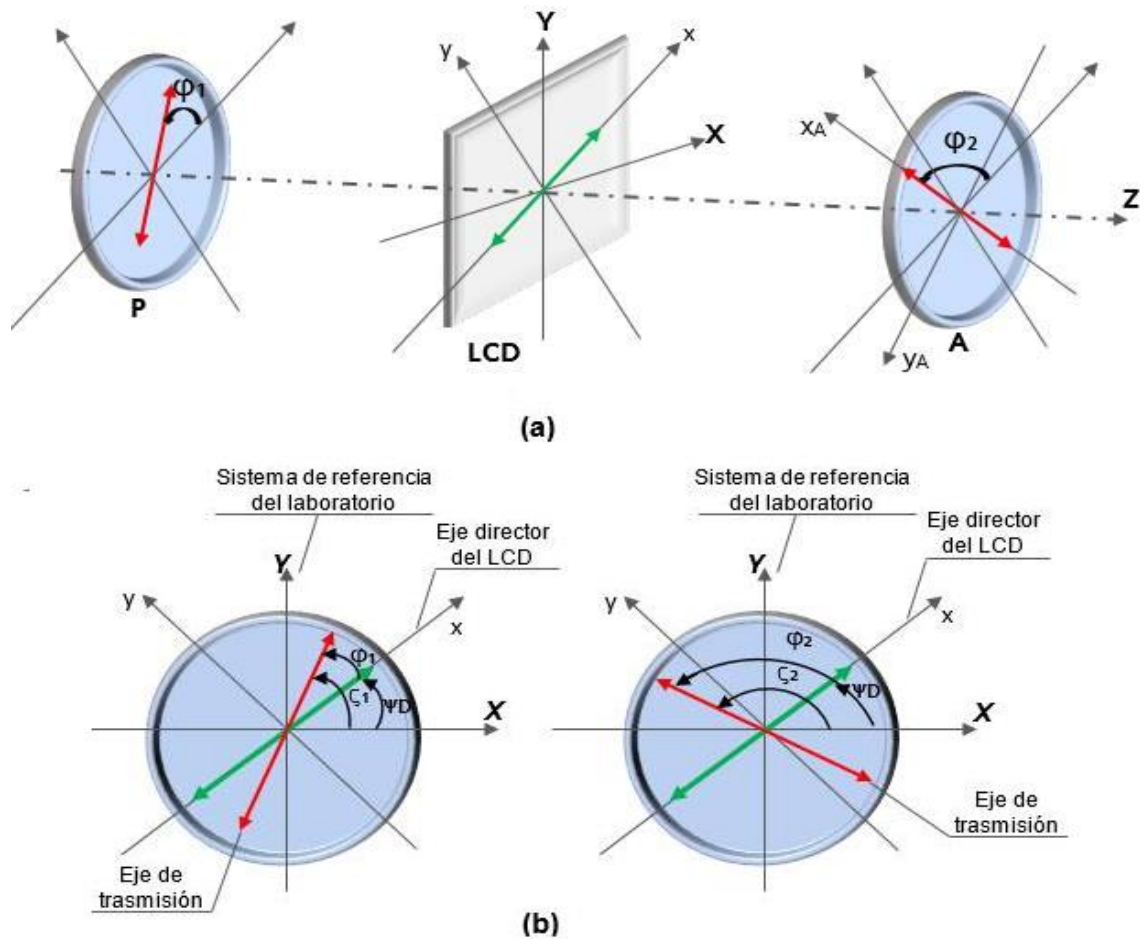
$$T_p = \left[\cos\gamma \cos\emptyset + \frac{\emptyset}{\gamma} \sin\gamma \cos\emptyset \right]^2 + \left[\frac{\beta}{\gamma} \sin\gamma \cos(2\zeta_1 - \emptyset - 2\Psi_D) \right]^2. \quad (6)$$

7. Encontrar el cociente entre las transmitancias experimentales de la configuración perpendicular y la paralela (ajustada previamente con una regresión no lineal) en función del desplazamiento angular ζ_1 .
8. Encontrar la magnitud del ángulo de giro molecular que mejor ajusta las expresiones teóricas con las experimentales de los cocientes entre las transmitancias en perpendicular y paralelo en función del desplazamiento angular ζ_1 . Este valor será la magnitud del ángulo de giro molecular de la TN-LCD. Esto se hace mediante un algoritmo de optimización manual o automático.
9. Hallar la magnitud del ángulo del eje molecular con el valor previamente hallado de la magnitud del ángulo de giro molecular y la relación matemática del paso 5. Este valor será la magnitud del eje del molecular de la TN-LCD.
10. Ajustar el valor de la birrefringencia que mejor se concuerda por separado tanto a la curva experimental como teórica en las transmitancias en paralelo y cruzada. Este valor será el valor de birrefringencia del TN-LCD.

Algunos autores en el paso 8 encuentran los valores de birrefringencia y magnitud del ángulo de giro molecular que mejor ajustan los cocientes experimentales y teóricos de transmitancia cruzada y paralela [16, 17]. De acuerdo al anterior método descrito desde los pasos 1-10 es posible encontrar como resultado los valores

absolutos del ángulo de giro molecular (ϕ), birrefringencia (β) y el ángulo del eje molecular (Ψ_D) para la TN-LCD sin campo aplicado. En las ecuaciones (5) y (6), $\gamma = \sqrt{\phi^2 + \beta^2}$ y $\zeta_1 = \Psi_D + \phi_1$, (ϕ_1 es el ángulo que se forma entre el eje de transmisión del polarizador y el eje molecular de la cara de entrada de la matriz "x", "y" mostrado en la figura 5.

Figura 5. Diagrama de los sistemas de referencia y ángulos involucrados en el método de Soutar y Lu. a) P, polarizador; LCD, dispositivo de cristal líquido y A, analizador. b) De izquierda a derecha se detalla el diagrama de ángulos para el polarizador y analizador, respectivamente.



No obstante, de las ecuaciones (5) y (6) es posible ver que [16, 17]:

$$T_{p,c} \left(\varnothing = \frac{\pi}{2} \right) = T_{p,c} \left(\varnothing = -\frac{\pi}{2} \right) \quad (7)$$

y

$$T_{p,c} \left(\Psi_D + \frac{\pi}{2} \right) = T_{p,c}(\Psi_D) \quad (8)$$

Es decir que el procedimiento de Soutar-Lu no permite encontrar los signos de los ángulos del eje molecular y del giro molecular.

2.2.1. Método de los parámetros de Stokes. El método de Soutar-Lu puede ser empleado para encontrar la magnitud del ángulo de giro molecular (\varnothing) y ángulo del eje molecular (Ψ_D). Ahora para encontrar los signos de los parámetros \varnothing y Ψ_D son utilizados los parámetros los Stokes. Estos parámetros pueden ser interpretados como una representación en la esfera de Poincaré de la acción de un dispositivo de cristal líquido y constituye el método más general para representar geoméricamente los estados de polarización de un haz luminoso a través de elipses, así como las transformaciones que sufren éstas elipses por la acción de un sistema de polarización [17].

Partiendo de la representación de los parámetros de Stokes denotados por S_0 , S_1 , S_2 , y S_3 , entonces es posible resolver las ambigüedades asociadas a \varnothing y Ψ_D , utilizando la relación única que existe entre un estado de polarización incidente sobre la TNLCD y un punto en la esfera de Poincaré [42]. Dicho análisis se realizó determinando el valor de los parámetros de Stokes de la luz que emerge del dispositivo por medio de las siguientes expresiones para ondas electromagnéticas en el visible e incidentes sobre la TN-LCD dadas por [17, 43]:

$$S_0 = X^2 + Y^2 + Z^2 = 1; \quad (9)$$

$$S_1 = (X^2 - Z^2)\cos[2(\emptyset + \zeta_1)] + 2XZ\sin[2(\emptyset + \zeta_1)] + Y^2\cos[2(\emptyset + 2\Psi_D - \zeta_1)]; \quad (10)$$

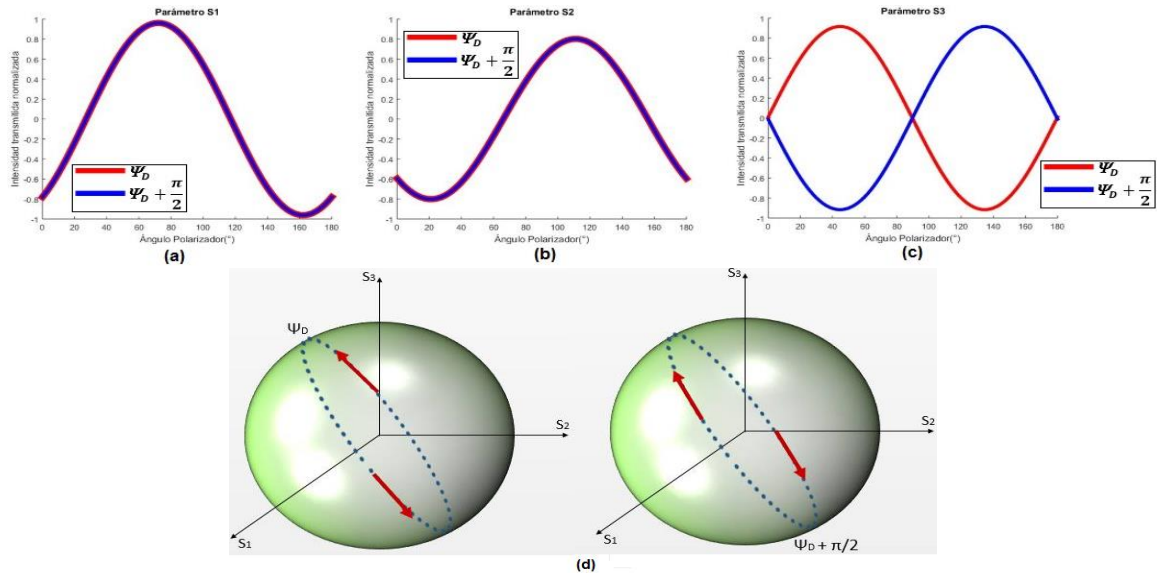
$$S_2 = (X^2 - Z^2)\sin[2(\emptyset + \zeta_1)] - 2XZ\cos[2(\emptyset + \zeta_1)] + Y^2\sin[2(\emptyset + 2\Psi_D - \zeta_1)]; \quad (11)$$

$$S_3 = -2Y(Z\cos[2(\Psi_D - \zeta_1)] + X\sin[2(\Psi_D - \zeta_1)]). \quad (12)$$

Donde $X = \cos\gamma$, $Y = \left(\frac{\beta}{\gamma}\right)\sin\gamma$ y $Z = \left(\frac{\emptyset}{\gamma}\right)\sin\gamma$.

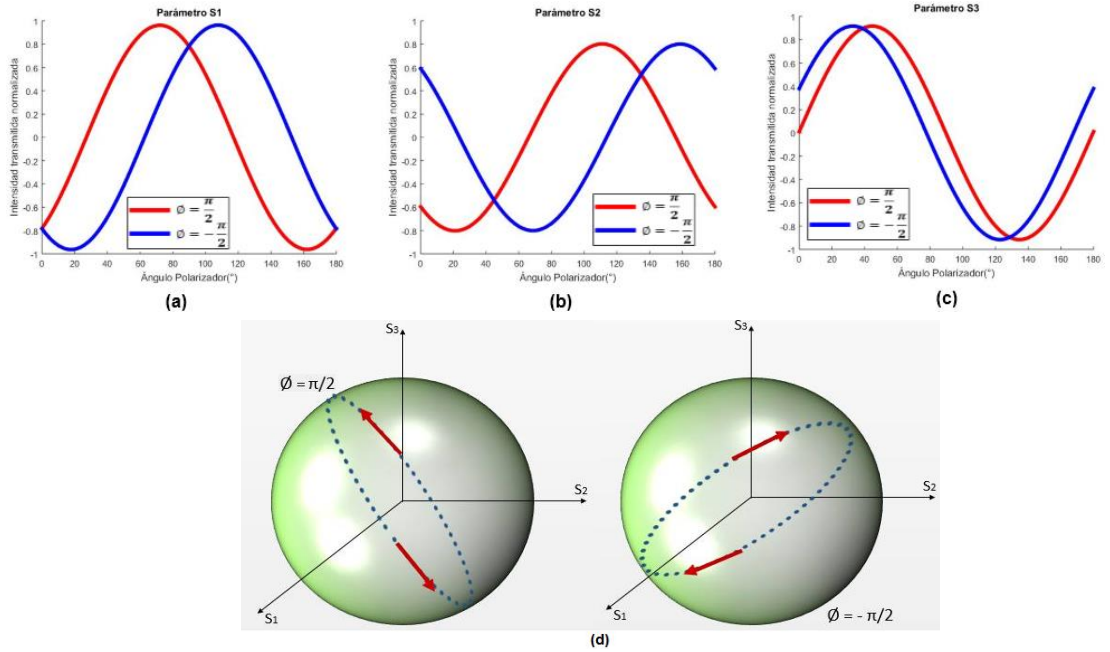
De esta manera la gráfica de la figura 6 muestra que el valor de S_3 cambia de signo cuando Ψ_D se substituye por $\Psi_D + \pi/2$, mientras que S_1 y S_2 permanecen invariantes [17]. Por lo tanto, el signo del parámetro S_3 fija el signo de Ψ_D . Desde éste punto de vista de la polarización, el cambio de signo de Ψ_D equivale a cambiar la dirección de giro del campo eléctrico de dextrógira a levógira manteniendo invariantes la forma e inclinación de la elipse de polarización.

Figura 6. Curvas teóricas para los parámetros de Stokes cuando se sustituye Ψ_D (línea roja) por $\Psi_D + \pi/2$ (línea azul). a) Parámetro S_1 . b) Parámetro S_2 . c) Parámetro S_3 . d) Representación en la esfera de Poincaré.



Ahora la ambigüedad en el signo de \emptyset , que representa una inversión en el sentido del ángulo de giro de las moléculas, provoca, de acuerdo con las ecuaciones. (10, 11,12), un cambio en el valor de los tres parámetros S_1, S_2 y S_3 aunque no de la intensidad transmitida que corresponde a S_0 como puede verse en la figura 7, es decir que el signo de \emptyset provoca un cambio en la forma, inclinación y sentido de giro de la elipse de polarización en la esfera de Poincaré.

Figura 7. Curvas teóricas para los parámetros de Stokes cuando se sustituye $\phi = \pi/2$ (línea roja) por $\phi = -\pi/2$ (línea azul). a) Parámetro S_1 . b) Parámetro S_2 . c) Parámetro S_3 . d) Representación en la esfera de Poincaré.

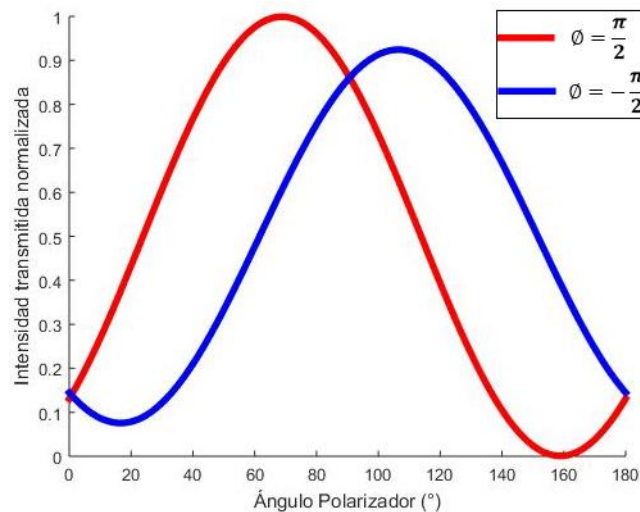


Sin embargo también es posible hallar el signo del ángulo de giro (ϕ) de la TN-LCD, por medio de un experimento adicional, que consiste en dejar el ángulo del eje de transmisión en el analizador $\zeta_2 = 0^\circ$, y variar ζ_1 en el polarizador entre 0° y 180° a pasos bien definidos por la resolución del sistema medidor, registrando los datos de la intensidad de salida que presenta el sistema polarizador – LCD – analizador. La curva que se obtiene de estas medidas se compara con la curva teórica, tomando en cuenta que la intensidad asociada con el campo de salida E_{out} que emerge del analizador corresponde a [17]:

$$T = [X\cos(\zeta_1 - \zeta_2 + \phi) + Z\cos(\zeta_1 - \zeta_2 + \phi)]^2 + [Y\sin(\zeta_1 - \zeta_2 + \phi - 2\Psi_D)]^2 \quad (13)$$

De acuerdo con la ecuación (13) es posible obtener dos curvas para el ángulo de giro (ϕ), cuando éste es $\phi = \pi/2$ o $\phi = -\pi/2$, tal como se muestra en la figura 8. Por tanto, el signo queda determinado cuando alguna de las dos curvas teóricas se ajuste con la curva experimental obtenida.

Figura 8. Intensidad asociada al estado de polarización que emerge del analizador cuando el ángulo de giro es, $\phi = \pi/2$ (línea roja) o $\phi = -\pi/2$ (línea azul).



No obstante, la desventaja del anterior método concierne a que no posee ninguna interpretación desde el punto de vista electroóptico, es decir utilizando los parámetros de Stokes y la esfera de Poincaré.

2.3 CARACTERIZACIÓN DE UNA MATRIZ DE CRISTAL LÍQUIDO CON VOLTAJE APLICADO.

Cuando a una TN-LCD se le aplica una diferencia de potencial entre las capas que conforman la matriz, el único parámetro que puede considerarse constante es el ángulo del eje molecular de la cara de entrada Ψ_D , ya que en la construcción de la matriz las moléculas en la cara de entrada son insertadas sobre placas transparentes con canaladuras en la dirección de Ψ_D (también a la salida de la TN-LCD), como se aprecia en la figura 9. Sin embargo, en las restantes capas las moléculas no sólo cambian su orientación sino también su inclinación de acuerdo a como se esquematiza en la figura 10. Esta situación causa que la transmitancia disminuya a la salida de la matriz en función del voltaje aplicado entre las capas (véase figura 11). Ésta nueva variable de inclinación en las moléculas causa que no sea posible usar el mismo procedimiento matemático desarrollado para la matriz sin voltaje aplicado, para encontrar una expresión analítica de la transmitancia a la salida.

Figura 9. Orientación molecular en una TN-LCD ($\phi = \pi/2$) en tres situaciones. a) En ausencia de potencial. b) Cuando se aplica una diferencia de potencial aproximadamente igual al potencial umbral. c) Cuando se aplica una diferencia de potencial muy intensa entre la cara de entrada y salida de la matriz.

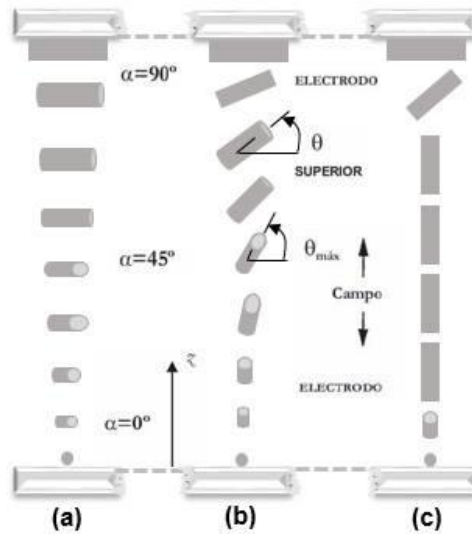


Figura 10. Orientación e inclinación molecular en una TN-LCD ($\phi = \pi/2$), cuando se aplica una diferencia de potencial entre la cara de entrada y salida de la matriz.

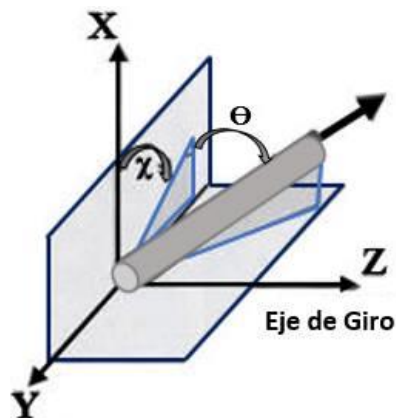
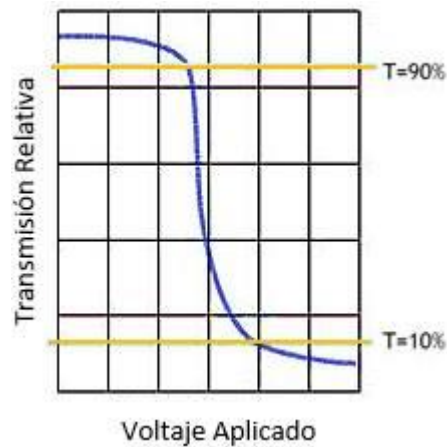


Figura 11. Relación entre transmitancia a la salida de la TN-LCD en función del voltaje aplicado entre las capas de la matriz. Fuente [1] modificado autor

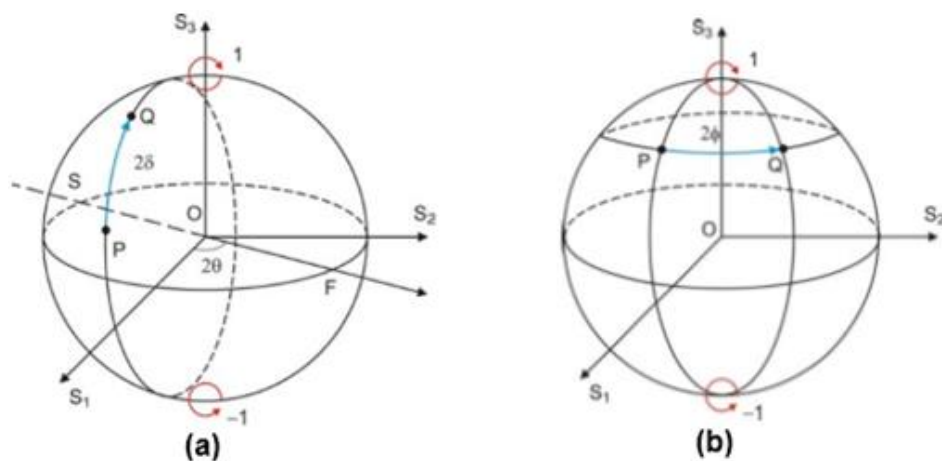


No obstante, en 1941 Hurwitz y Jones demostraron una serie de teoremas de equivalencia que permiten descomponer un sistema complejo de polarización en una secuencia de retardadores lineales, rotores y polarizadores [44]. Utilizando estos teoremas de equivalencia la descomposición en la secuencia retardador-rotor, es posible aplicarla a las TN-LCD, para poder llevar a cabo una caracterización completa de las propiedades de modulación en fase y amplitud de la TN-LCD al aplicarle un valor bien definido del voltaje.

De acuerdo a lo anterior, una TN-LCD equivale a un sistema de polarización formado únicamente por un retardador lineal (véase figura 12.a) seguido de un rotor (véase figura 12.b), tanto en presencia como en ausencia de una diferencia de potencial aplicado a ésta [17]. Estos parámetros retardador-rotor son similares a la birrefringencia y ángulo de giro molecular, respectivamente en el análisis para la

TN-LCD sin voltaje aplicado. De manera que el retardador-rotor poseerá un claro significado electroóptico por medio del formalismo de la esfera de Poincaré [43].

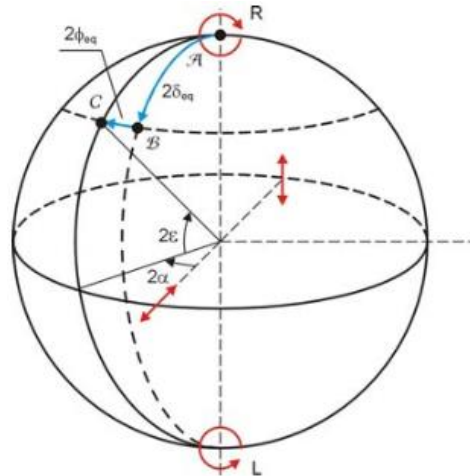
Figura 12. a) Acción de una lámina retardadora sobre un estado de polarización P. Los segmentos OF y OS representan, respectivamente, los ejes rápido y lento de la lámina y Q, el estado de polarización final. b) Acción de un rotor sobre un estado de polarización inicial P. El punto Q representa el estado de polarización final. Fuente [17, 45 - 47]



Por consiguiente, la acción de una TN-LCD sobre un estado de polarización inicial se puede describir sencillamente mediante dos rotaciones sucesivas en la esfera de Poincaré cuyas características dependen de los valores que en cada caso particular toman los parámetros equivalentes del sistema, es decir dichas rotaciones corresponden, respectivamente, a la acción del retardador y a la del rotor del sistema equivalente. La figura 13 muestra la acción de una TN-LCD sobre una onda electromagnética con polarización circular derecha. En la figura 13 se aprecia como el estado inicial A , situado en el polo norte de la esfera, sufre un retardado $2\delta_{eq}$ equivalente descrito por una rotación de magnitud α a lo largo del círculo

meridiano normal al eje rápido del retardador, lo que conduce al estado intermedio B . Finalmente, un giro de $2\phi_{eq}$ a lo largo del círculo paralelo que pasa por B determina el estado de polarización final del haz, representado por el punto C . El ángulo polar 2ε correspondiente al estado final C no depende del valor de giro efectivo ϕ_{eq} sino sólo del valor del retardo δ_{eq} . Entre tanto, ϕ_{eq} está determinado por el ángulo 2α y la orientación del eje rápido de la lámina, es decir es independiente de δ_{eq} . Esto implica que cada una de estas rotaciones (δ_{eq} y ϕ_{eq}) pueden ser estimadas utilizando luz polarizada circularmente derecha (izquierda también).

Figura 13. Descripción en la esfera de Poincaré del efecto de una celda de TN-LCD sobre luz circularmente polarizada. R y L representan, respectivamente, luz circular dextrógira y levógira. Los ángulos 2α y 2ε son las coordenadas esféricas (longitud y latitud) del estado de polarización final. Fuente [45 - 47]



Matemáticamente lo anterior implica que una TN-LCD en función del retardo y rotor puede ser descrita como [17]:

$$M_{TN-LCD} = \exp(-i\beta)R(\phi_{eq})WP\left(2\delta_{eq}, \frac{\phi + \phi_{eq}}{2}\right),$$

(14)

siendo β la birrefringencia con voltaje cero mientras δ_{eq} y ϕ_{eq} el retardo y rotor para cada diferencia de potencial respectivamente (ver deducción en el anexo 2). Luego la onda electromagnética tendrá un campo de salida E_{out} que se obtiene al aplicar una polarización circular sobre la TN-LCD y puede ser escrita por la siguiente ecuación [17, 48]:

$$E_{out} = \exp(-i\beta)\mathbf{R}(\phi_{eq})\mathbf{WP}\left(2\delta_{eq}, \frac{\phi + \phi_{eq}}{2}\right)E_{in}, \quad (15)$$

donde E_{in} representa el estado de polarización circular inicial, $\exp(-i\beta)$ es el retardo inherente del material, $\mathbf{R}(\phi_{eq})$ es la rotación o rotor y $\mathbf{WP}\left(2\delta_{eq}, \frac{\phi + \phi_{eq}}{2}\right)$ es el retardo que describe el estado de polarización en función del voltaje externo aplicado. A partir de las componentes cartesianas del campo eléctrico E_{out} es posible encontrar las expresiones matemáticas para los parámetros de Stokes de la luz transmitida por la TN-LCD, dadas por [17]:

$$S_0 = 1, \quad (16)$$

$$S_1 = \sin(\phi - \phi_{eq}) \sin 2\delta_{eq}, \quad (17)$$

$$S_2 = -\cos(\phi - \phi_{eq}) \sin 2\delta_{eq}, \quad (18)$$

$$S_3 = \cos 2\delta_{eq}, \quad (19)$$

luego de la ecuación (19) se observa que es posible hallar el retardo equivalente δ_{eq} utilizando el parámetro S_3 . Mientras del cociente entre S_1/S_2 puede determinar el giro equivalente ϕ_{eq} , cuando se le aplique una diferencia de potencial a la TN-LCD [17]:

$$\delta_{eq} = \frac{1}{2} \arccos(S_3)$$

(20)

$$\Phi_{eq} = \Phi + \arctan\left(\frac{S_1}{S_2}\right) \quad (21)$$

2.4 APLICACIONES DE LOS MODULADORES ESPACIALES DE LUZ EN LAS COMUNICACIONES.

Las comunicaciones ópticas son un método de transmisión de la información que en esencia envía señales de luz desde un emisor a un receptor [27- 29]. En los últimos años el momento angular orbital (MAO) de un haz luminoso ha mostrado experimentalmente ser una propiedad útil en el multiplexado de información en el espacio libre [28] y confinado [29] ya que permite generar una amplia gama, en principio infinita de singularidades de fase para codificar datos en una base numérica distinta a la binaria.

El momento angular orbital de la luz (MAO) es una propiedad física presente en la dinámica rotacional del frente de onda del campo electromagnético de un haz luminoso [19]. El MAO de la radiación electromagnética, se puede describir partiendo de las ecuaciones de Maxwell en un espacio libre [23, 49]:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0 \quad (22)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (23)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\partial \vec{B} / \partial t \quad (24)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \left(\frac{1}{c^2}\right) \left(\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}\right), \quad (25)$$

y realizando un debido análisis físico-matemático de estas ecuaciones se encuentra que la densidad del momento angular total \vec{j} del campo electromagnético es [50]:

(26)

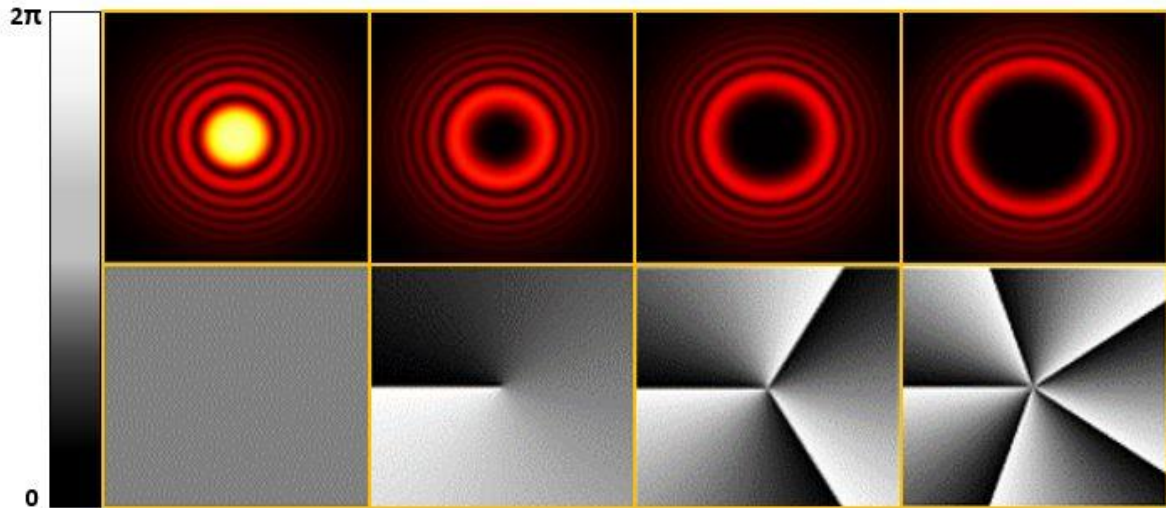
$$\vec{J} = \int (\epsilon_0 (\vec{r} \times (\vec{E} \times \vec{B}))) ds,$$

donde el momento angular total \vec{J} consta de dos partes bajo la hipótesis de aproximación paraxial; \vec{S} relacionada al spin y \vec{L} al momento angular orbital [23, 51]:

$$\vec{J} = \vec{S} + \vec{L}. \quad (27)$$

En un haz luminoso con momento angular orbital (MAO) se generan singularidades ópticas debido a la rotación del frente de onda de un haz luminoso sobre su eje de propagación [52- 54]. Ésta singularidad óptica en el haz luminoso está referida a su estructura de fase de campo electromagnético. Haces luminosos con un factor de fase azimutal de $e^{im\theta}$ poseen momento angular bien definido m , siendo m un valor entero [19]. La figura 14 muestra haces Bessel-Gauss que transportan momento angular bien definido (m) junto a su respectiva representación en fase generados numéricamente utilizando máscaras holográficas.

Figura 14. Representación del Momento Angular Orbital con valores enteros bien definidos de izquierda a derecha $m=0, 1, 3,$ y $m=5,$ respectivamente (Arriba: Distribución de intensidad. Abajo: Representación de la fase) Fuente [55] modificado autor



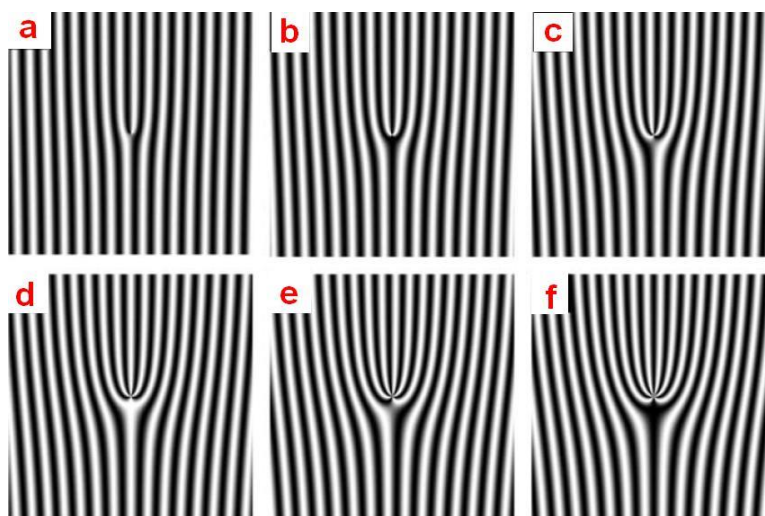
Para la generación de haces con momento angular orbital una de las técnicas utilizadas con mayor frecuencia son los hologramas generados por computador [56-58]. Los hologramas computarizados pueden ser desplegados sobre un modulador espacial de luz (SLM), lo cual confiere a este método la ventaja adicional de la versatilidad en la dinámica de manipulación y asignación de cambios in situ.

Los hologramas computarizados pueden ser generados a partir de un patrón holográfico digital en forma de tenedor, el cual consiste de una rejilla holográfica constituida de pixeles, cuya función de transmitancia es la interferencia de una onda plana de referencia y una onda helicoidal objeto (con un término $e^{im\theta}$) dada por [19, 20],

$$I = |e^{ikx} + e^{il\theta}|^2 = 2 + 2 \cos(kx - l\theta) = 2(1 + \cos(kx - l\theta)).$$

Donde $\theta = \tan^{-1}(y/x)$ es el ángulo acimutal en coordenadas polares, k es el número de onda y m es el índice acimutal también llamado carga topológica. La figura 15 muestra los hologramas computarizados en amplitud para los valores de carga topológica desde $m=1$ hasta $m=6$.

Figura 15. Hologramas computarizados en amplitud para los valores de cargas topológicas: a) $m = 1$, b) $m = 2$, c) $m = 3$, d) $m = 4$, e) $m = 5$ y f) $m = 6$. Fuente [19]



3. CARACTERIZACIÓN DE UNA MATRIZ DE CRISTAL LIQUIDO MEDIANTE EL MODELO RETARDADOR-ROTOR.

En la mayor parte del capítulo anterior se describió detalladamente a partir de los conceptos electroópticos la manera de caracterizar una TN-LCD en el modo acoplado en intensidad. De esta manera se mostró que el Método de Soutar-Lu acompañado de los parámetros de Stokes, permiten una adecuada caracterización cuando sobre la TN-LCD no hay diferencia de potencial aplicado. Adicionalmente se explicó como el modelo de retardador-rotor puede ser usado para caracterizar la TN-LCD cuando una tensión eléctrica es aplicada sobre ella.

En el presente capítulo utilizando los referentes teóricos del capítulo anterior se describen y muestran los resultados de la caracterización de una TN-LCD Sony modelo LXC038ARA con y sin diferencia de potencial aplicado con una longitud de onda de 632,8 [nm]. De esta manera el capítulo ha sido estructurado en tres secciones de la siguiente forma, en la sección 3.1 se muestra el TN-LCD Sony con las especificaciones técnicas dadas por el fabricante. En la sección 3.2 se detalla el montaje experimental y analizan resultados obtenidos para la caracterización de los parámetros ángulo de giro molecular, birrefringencia y ángulo del eje molecular del TN-LCD Sony sin diferencia de potencial aplicado, mientras que en la sección 3.3 se describe y analizan los resultados para el retardo equivalente (δ_{eq}) y giro efectivo (ϕ_{eq}) cuando sobre la TN-LCD Sony se establece un voltaje distinto de cero. Finalmente en la sección 3.4 se describe el procedimiento para hallar los valores de contraste y brillo de la TN-LCD.

3.1 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS DE FABRICACIÓN DE LA TN-LCD. RESULTADOS TEÓRICOS Y EXPERIMENTALES EN AUSENCIA DE VOLTAJE.

La TN-LCD empleada en el presente trabajo de investigación es una pantalla Sony modelo LCX038ARA. La tabla 1 muestra algunas de las más relevantes especificaciones técnicas de la matriz SONY XGA1 modelo LCX038ARA⁴.

Tabla 1 Especificaciones del panel LCD. Fuente [59, 60]

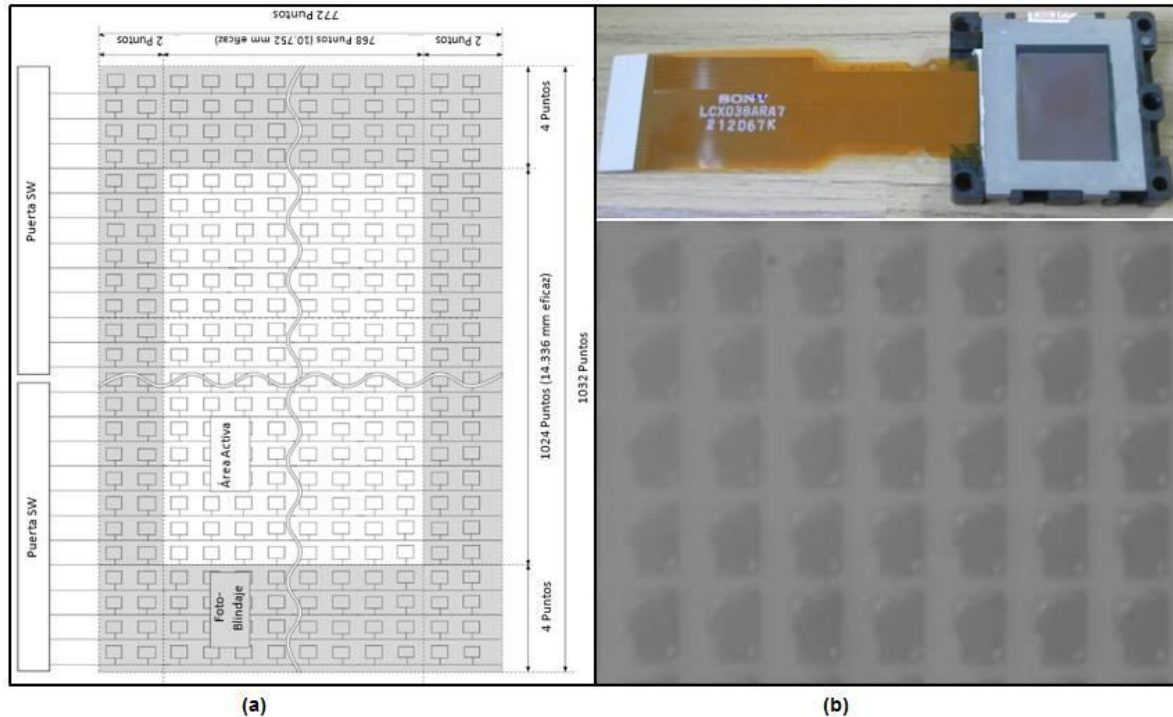
ESPECIFICACIONES	
Resolución espacial	1024(H) por 768(V) píxeles monocroma
Paso de Píxel	36 μ m(H) x 36 μ m(V)
Dimensión del píxel	33 μ m(H) x 25 μ m(V) píxeles rectangulares
Dimensión del panel	Área Activa 36.9mm(H) x 27.6mm(V)
Transmisión	21% típica de 600nm
Factor de llenado	64% con máscara metálica opaca entre los píxeles
Razón de contraste	>100:1 se puede lograr fácilmente en el eje
Cross talk	Max 5%

Por otra parte, en la parte izquierda de la figura 16.a se muestra un esquema de la TN-LCD, en el cual las partes claras y oscuras corresponden a las áreas con píxeles activos e inactivos de la matriz, respectivamente. Y en la parte derecha de la misma

⁴ Otra característica es el número de niveles de fase que puede utilizar a una determinada longitud de onda

figura se observa una fotografía de la TN-LCD tanto macroscópica como microscópica.

Figura 16. a) Esquema de la TN-LCD, en el cual las partes claras y oscuras corresponden a las áreas con pixeles activos e inactivos de la matriz, respectivamente. b) Fotografía de la TN-LCD tanto macroscópica (arriba) como microscópica (abajo). Fuente [60 - 62], modificado autor.



3.2 CARACTERIZACIÓN DE LA TN-LCD SONY SIN DIFERENCIAS DE POTENCIAL APLICADO.

El montaje experimental mostrado en la figura 17 fue utilizado para caracterizar la TN-LCD sin diferencia de potencial aplicado utilizando el método de Soutar y Lu. La Fuente de iluminación es un láser (L) de He-Ne R30990 de 632,8 [nm] operando con una potencia de 5 [mW] y polarización aleatoria. Con el propósito de eliminar las frecuencias espaciales altas del haz luminoso emergente del láser, catalogado como ruido, son utilizados el objetivo (O) y el “pinhole” o frecuencia espacial (PH),

respectivamente. Después el haz es colimado dejando todos los puntos del frente de onda luminosa con la misma fase utilizando la lente etiquetada con L1. La elección de la lente L1 fue hecha teniendo en cuenta la forma de iluminar completamente el área activa en la TN-LCD. La matriz de cristal líquido se ubica en medio del polarizador (P) y analizador (A) con resolución angular de dos grados, respectivamente. Finalmente, a la salida del analizador se hace converger el haz luminoso en la distancia focal de una lente (L2) dentro del eje óptico con el fin de registrar eficientemente las lecturas de intensidad en el medidor de potencia luminosa (PM)⁵.

Figura 17. Montaje de laboratorio para registrar los datos obtenidos a través del método de Soutar-Lu. L, láser; O, objetivo; PH, pinhole; F1, apertura; L1, lente colimadora; P, polarizador; LCD, dispositivo de cristal líquido; A, analizador; L2, lente corregida de Fourier; F2, otra apertura y PM, medidor de potencia.

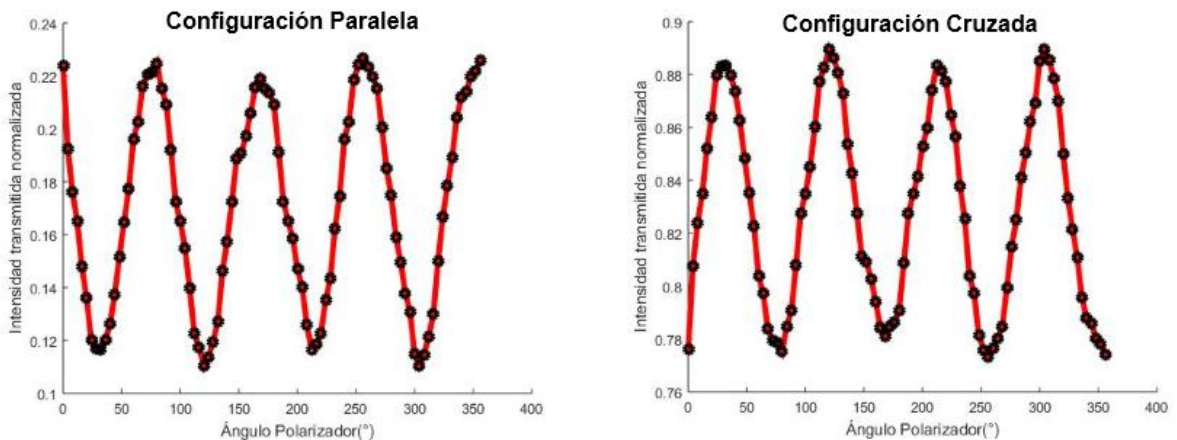


Utilizando el anterior esquema se obtienen los datos experimentales de intensidad obtenidos en la configuración paralela ($\zeta_1 = \zeta_2$) y configuración cruzada ($\zeta_1 = \zeta_2 + \pi/2$), variando los ángulos del polarizador y del analizador, ζ_1 y ζ_2 entre 0° y 360°

⁵ F2 es utilizado para obtener sólo el orden de difracción central

en intervalos de 4° en general. La figura 18 muestra las gráficas experimentales de intensidad luminosa obtenidas para la configuración paralela y cruzada, respectivamente.

Figura 18. Gráficas experimentales de intensidad luminosa obtenidas para la configuración paralela y cruzada, respectivamente.



Ahora de la ecuación teórica (5) del capítulo anterior para la configuración cruzada puede verse que la mínima intensidad transmitida en ésta configuración se obtendrá cuando el argumento de la función seno sea cero, es decir que se puede establecer una ecuación matemática entre \varnothing y $2\Psi_D$ dada por [16, 17],

$$\Psi_D = \frac{2\zeta_1 - \varnothing}{2}. \quad (29)$$

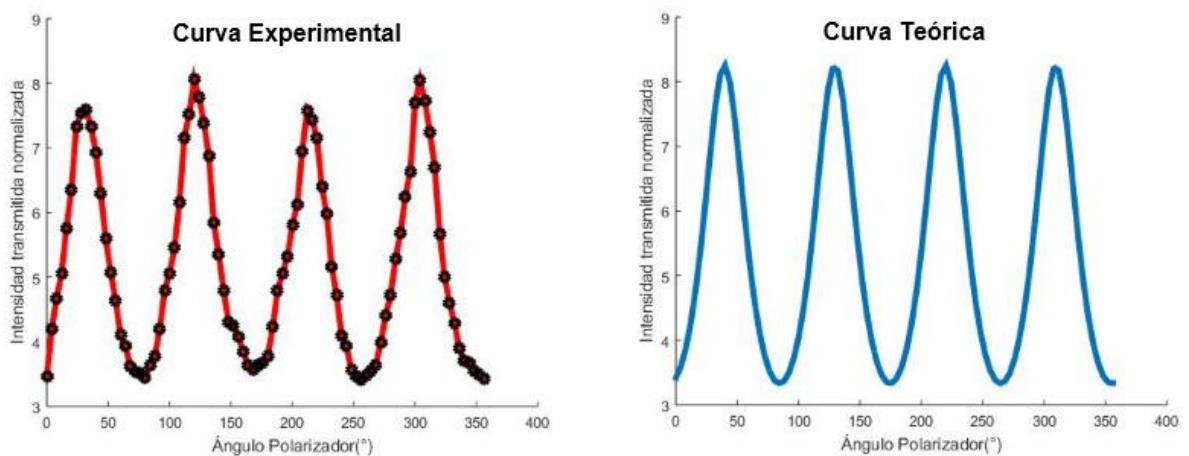
En la anterior ecuación ζ_1 corresponde a la magnitud angular a la cual se obtuvo el valor de intensidad. Sí se utiliza la gráfica experimental obtenida para la configuración cruzada se encuentra que el primero de los mínimos por interpolación

no lineal utilizando la función spline de **Matlab**® tiene un valor de 32°, entonces la ecuación (29) puede escribirse como:

$$\psi_D = \frac{2(32) - \phi}{2}. \quad (30)$$

Por otra parte, la parte izquierda y derecha de la figura 19 muestra los resultados obtenidos para los cocientes entre las configuraciones cruzada y paralela, experimental y teóricamente, respectivamente. La curva que conecta los datos experimentales fue realizada mediante un ajuste no lineal a través de la rutina “spline” del programa **Matlab**®.

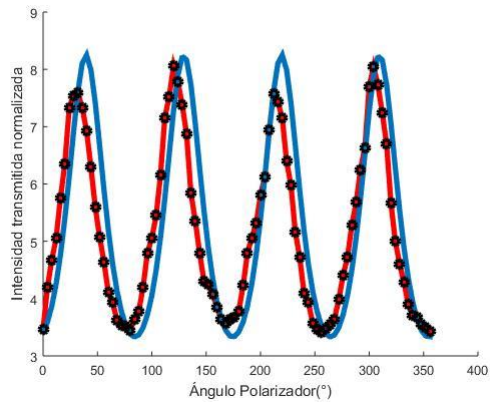
Figura 19. Resultados obtenidos para los cocientes entre las configuraciones cruzada y paralela, experimental y teóricamente, respectivamente.



Se ajusta el valor en magnitud del giro molecular a $93,8^\circ \rightarrow 1,637 \text{ rad}$ y el de birrefringencia a $2,126 \text{ rad}$ en el cociente de la curva teórica, entonces el cociente de la teórica se ajusta a la curva con los valores experimentales, con error porcentual menor al 15% entre cada pareja de datos tanto analíticos como experimentales, como se muestra en la figura 20. Por tal razón estos valores $93,8^\circ$

y 2,126 rad, pueden ser asumidos como las magnitudes experimentales del ángulo de giro molecular y la birrefringencia respectivamente.

Figura 20. Resultados experimentales (línea roja) y teóricos para los cocientes entre las configuraciones cruzada y paralela.



Finalmente, utilizando la ecuación (30) se halla que el ángulo experimental del eje molecular puede ser $+75,1^\circ$ o $-14,9^\circ$. La figura 21 muestra la curva teórica y experimental obtenida para las configuraciones, paralelo y cruzado, respectivamente. La tabla 2 muestra los posibles valores de caracterización del ángulo de giro molecular y el ángulo del eje molecular obtenidos utilizando el anterior método, así como el valor de la birrefringencia experimental hallado.

Figura 21. Resultados experimentales (línea roja) y teóricos (línea azul) para las configuraciones paralela y cruzada, respectivamente.

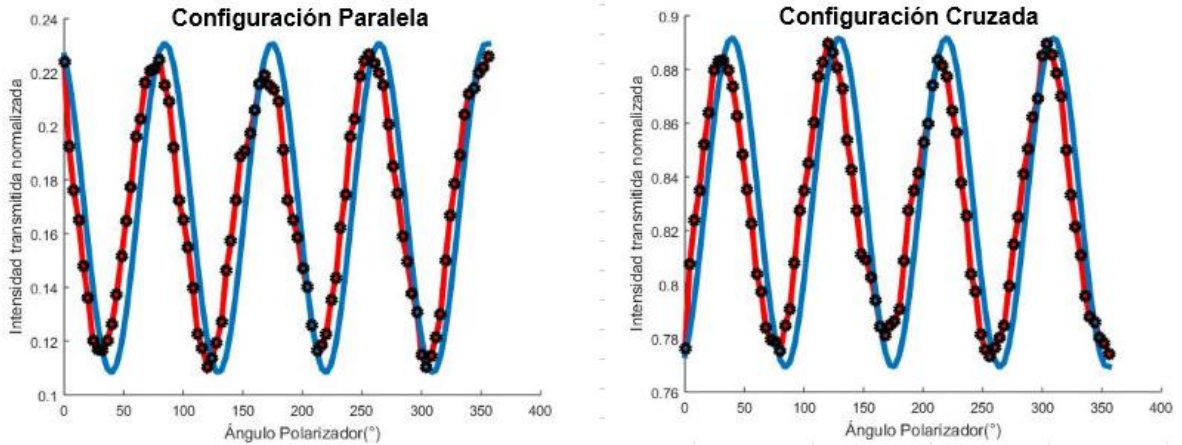


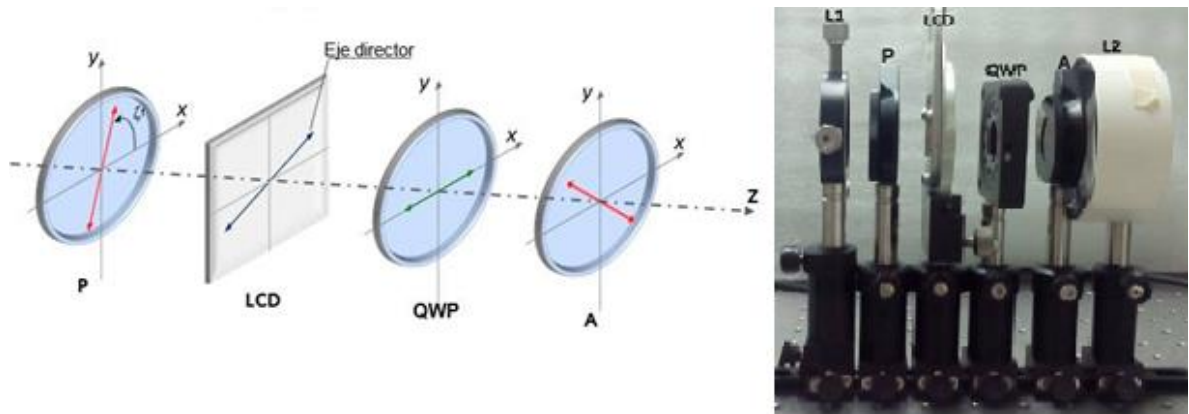
Tabla 2 Resultados de los parámetros físicos de la TN-LCD utilizando el método de Soutar-Lu.

PARÁMETROS	
Ángulo de giro (ϕ)	+93,8° o -93,8°
Ángulo del eje molecular (Ψ_D)	+75,1° o -14,9°
Birrefringencia (β)	2,126 rad

Para encontrar el valor unívoco del ángulo de giro y el ángulo del eje molecular, es decir el signo de cada valor y de acuerdo al método de los parámetros de Stokes descrito en la sección 2.2.1 del capítulo anterior se realizaron las correspondientes mediciones de S_1 , S_2 y S_3 [63]. Para hallar S_1 , se calcula la diferencia entre las intensidades transmitidas al orientar el analizador a $+90^\circ$ y -90° con respecto al eje x. En el caso de S_2 , se calcula la diferencia entre las intensidades transmitidas al orientar el analizador $+45^\circ$ y -45° con respecto al eje x. Finalmente para encontrar S_3 , se ubica entre la TN-LCD y el analizador una lámina que cambia el sentido de polarización del campo electromagnético del haz luminoso de salida de la TN-LCD de lineal a circular, es decir una lámina $\lambda/4$ (Diseñada para $\lambda = 632,8 [nm]$) como la mostrada en la figura 22. De manera que el parámetro S_3 es la

diferencia entre las intensidades transmitidas al orientar el analizador $+45^\circ$ y -45° con respecto al eje x . Los parámetros de Stokes se midieron variando el ángulo ζ_1 en el primer polarizador de 0° a 180° , en intervalos de 10° ya que la mayoría de métodos que lo hacen reportan éste criterio de resolución angular [64, 65].

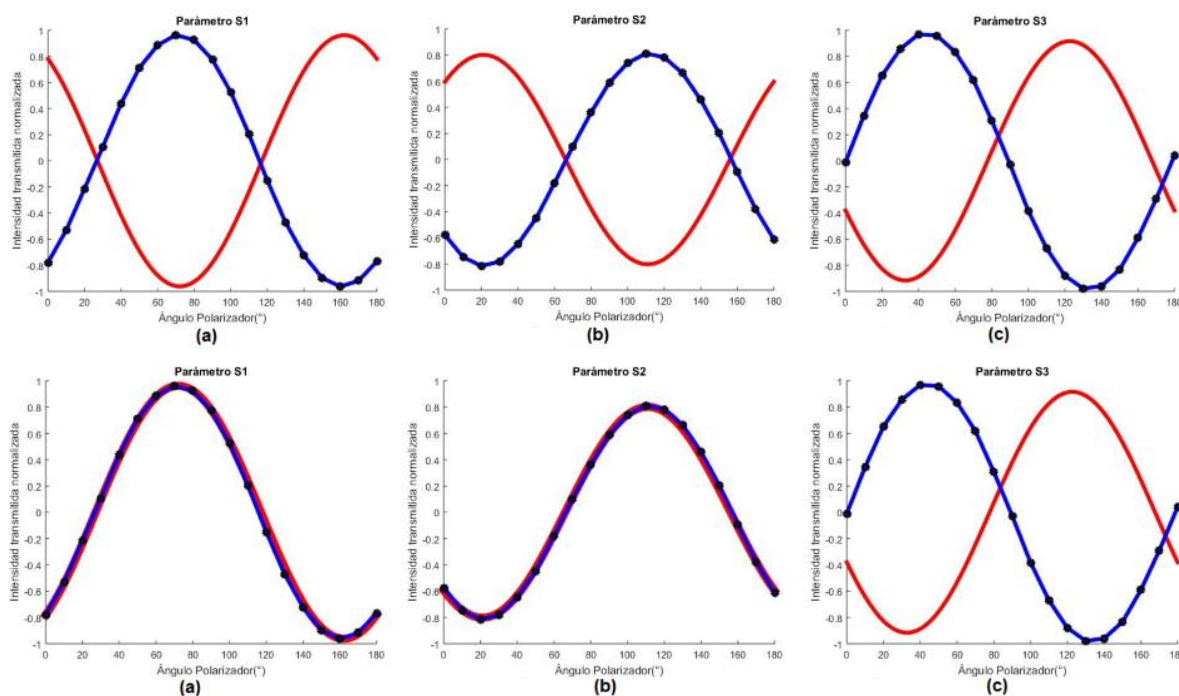
Figura 22. Montaje experimental para la medida de los parámetros de Stokes. L1, es la lente colimadora; P, el polarizador; LCD, el dispositivo de cristal líquido; QWP, la lámina de $\lambda/4$ que se emplea en la medida de S_3 y A, el analizador.



La figura 23 muestra las gráficas experimentales de los parámetros de Stokes y las correspondientes gráficas teóricas de estos mismos para los dos posibles valores del ángulo del eje molecular. De ésta manera en la primera fila de ésta figura se observa que la curva teórica de los parámetros de Stokes, cuando el ángulo de giro molecular tiene un valor $\Psi_D = +75,1^\circ$ (roja) no corresponde a la obtenida para los mismos parámetros experimentalmente (azul). Sin embargo como se aprecia en la segunda fila de la misma figura, sí el ángulo de giro molecular tiene un valor $\Psi_D = -14,9^\circ$ (roja) entonces las curvas teóricas (roja) para los parámetros S_1 y S_2 son muy similares a las obtenidas para los mismos parámetros experimentalmente (azul). En la misma segunda fila se observa que el parámetro S_3 no corresponde al valor

obtenido experimentalmente, es decir se cumple lo descrito en la sección 2.2.1 para los parámetros de Stokes, referente a S_1 y S_2 invariantes y S_3 distinto.

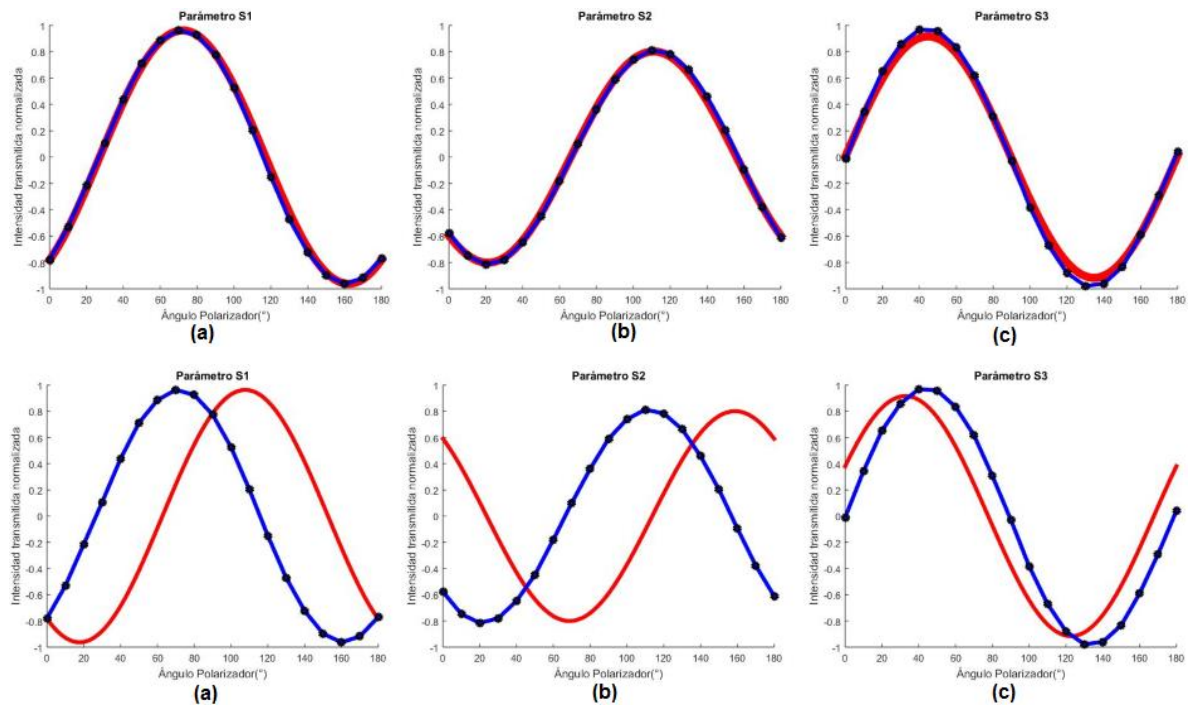
Figura 23. Resultados experimentales (línea azul) de S_1 , S_2 y S_3 ; y analíticos para los parámetros de Stokes con los dos posibles valores angulares de eje molecular. (Primera fila) valor analítico de $\Psi_D = 75,1^\circ$ valor analítico de (segunda fila) $\Psi_D = -14,9^\circ$.



De acuerdo al resultado obtenido anteriormente para el valor del ángulo del eje molecular, se puede inferir utilizando la ecuación (30) que el signo y la magnitud del ángulo de giro molecular son positivo y $93,8^\circ$, respectivamente. Este último valor puede ser corroborado, sí las expresiones analíticas de los parámetros de Stokes con el valor $\varnothing = 93,8^\circ$ son muy similares a los valores obtenidos experimentalmente de los mismos parámetros como se observa en la primera fila de la figura 24. Entre tanto sí el valor del ángulo de giro molecular es de $\varnothing = -93,8^\circ$, las gráficas

analíticas de S_1 , S_2 y S_3 , son diferentes a las obtenidas experimentalmente como se ve en la segunda fila de la figura 24.

Figura 24. Resultados experimentales (línea azul) de S_1 , S_2 y S_3 ; y analíticos para los parámetros de Stokes con los dos posibles valores angulares de giro molecular. (Primera fila) valor analítico de $\varnothing = +93,8^\circ$ (segunda fila) valor analítico de $\varnothing = -93,8^\circ$.



Finalmente en la Tabla 3 se muestran los resultados experimentales: ángulo de giro molecular (\varnothing), birrefringencia (β) y el ángulo del eje molecular (Ψ_D), obtenidos para nuestra TN-LCD Sony LCX038ARA en ausencia de voltaje.

Tabla 3 Resultados finales de los parámetros físicos de la TN-LCD.

PARÁMETROS	
Ángulo de giro (ϕ)	+ 93,8°
Ángulo del eje molecular (Ψ_D)	- 14,9°
Birrefringencia (β)	2,126 rad

Sin embargo como se explicó en la sección 2.2 es posible hallar el signo del ángulo de giro (ϕ) de la TN-LCD, por medio de un experimento adicional. Para dicho experimento se realizó el montaje de la figura 17, conservando el uso de los mismos equipos ópticos y de medición mencionados en el montaje de Soutar y Lu. Los datos experimentales se registraron con el ángulo del eje de transmisión en el analizador $\zeta_2 = 0^\circ$ y variando ζ_1 en el polarizador entre 0° y 180° a pasos de 10° , con una precisión de 2° (Ver anexo C).

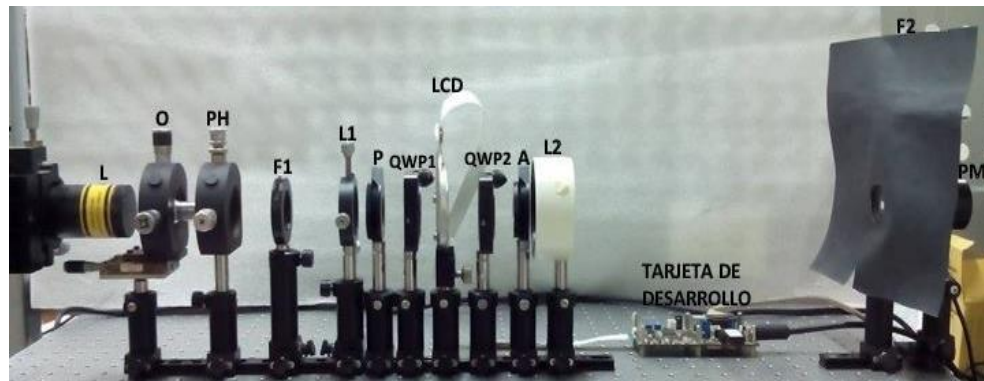
3.3 DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS CARACTERÍSTICOS DE UNA MATRIZ DE CRISTAL LÍQUIDO CON UNA DIFERENCIA DE POTENCIAL APLICADO.

Como se explicó en la sección 2.3 la TN-LCD se comporta como un sistema de polarización formado por un retardador seguido de un rotor. Su efecto sobre un estado de polarización arbitrario queda determinado por dos parámetros característicos, el giro efectivo ϕ_{eq} y el retardo equivalente δ_{eq} [17]. Tanto ϕ_{eq} como δ_{eq} , toman diferentes valores según la magnitud del voltaje aplicado en la matriz de cristal líquido. La aplicación de un voltaje externo sobre la TN-LCD se realiza transformando los niveles de grises en escala de 0-255 en diferencias de potencial a través del efecto fotoeléctrico (como se explicó en la sección 2.1). A

cada nivel de gris g le corresponde un voltaje V y la relación entre ambas magnitudes suele ser lineal y con la pendiente adecuada a utilizar todo el rango de valores [16].

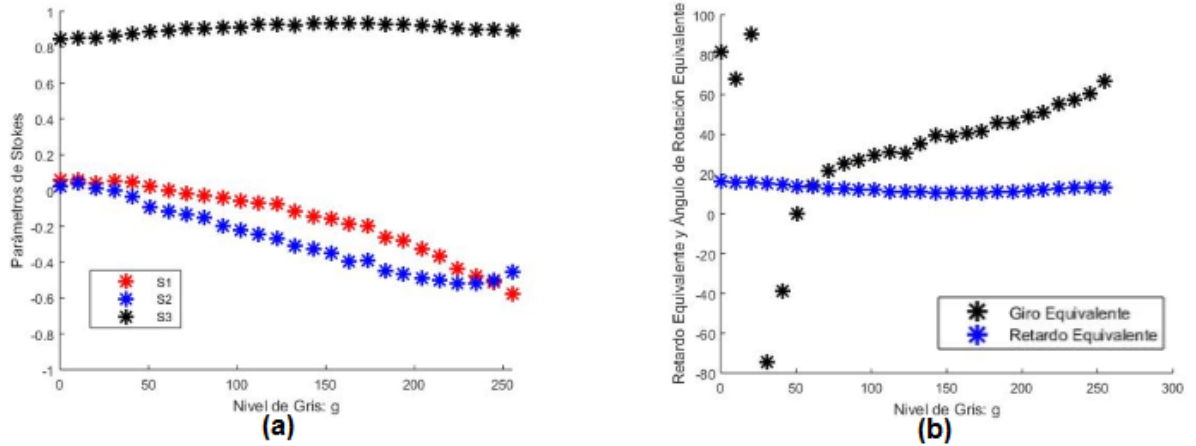
El montaje experimental utilizado para encontrar los valores experimentales de ϕ_{eq} y δ_{eq} de la TN-LCD es mostrado en la figura 25. El esquema experimental es similar al descrito en la sección 3.2 para la TN-LCD sin campo aplicado. En este nuevo montaje se han incluido dos láminas de un cuarto de onda. La primera lámina $\lambda/4$ es colocada antes de la TN-LCD para generar el estado de polarización circular requerido en el experimento. Mientras la segunda lámina $\lambda/4$ es colocada después de la TN-LCD para medición del parámetro S_3 . De ésta manera son obtenidos experimentalmente los parámetros de Stokes siguiendo un método análogo al de la sección anterior para una serie de 26 imágenes de niveles de gris variando entre $g=0$ y $g = 255$ en intervalos de 10 s y desplegadas sobre la TN-LCD.

Figura 25. Montaje realizado en el laboratorio para la medida de los parámetros característicos. L es el láser; O, el objetivo; PH, el pinhole; F1, es una apertura; L1, la lente colimadora; P es el polarizador; QWP1, una lámina de cuarto de onda con su eje rápido orientado a 45° con respecto al eje de transmisión del polarizador; LCD, dispositivo cristal líquido; QWP2, la lámina de cuarto de onda utilizada para la medida S_3 ; A, el analizador; L2, la lente corregida de Fourier; F2, otra apertura y PM, el medidor de potencia.



La parte izquierda de la figura 26 muestra los resultados experimentales de S_1 , S_2 y S_3 para cada nivel de gris g aplicado sobre la TN-LCD. A partir de éstas curvas experimentales y de las ecuaciones (20) y (21) del capítulo anterior son hallados los valores de ϕ_{eq} y δ_{eq} , mostrados en la parte derecha de la figura 26.

Figura 26. Resultados experimentales para los parámetros de Stokes S_1, S_2 y S_3 de la transmisión de luz polarizada circularmente en la TN-LCD en función de cada nivel de gris g aplicado.



No obstante de la figura experimental para los valores del giro efectivo puede notarse saltos abruptos para los primeros 7 niveles de grises. Este comportamiento puede ser explicado a partir de la correspondiente incertidumbre para ϕ_{eq} dada por [66]:

$$\sigma_{\phi_{eq}} = \frac{1}{S_1^2 + S_2^2} \sqrt{S_2^2 \sigma_1^2 + S_1^2 \sigma_2^2}, \quad (31)$$

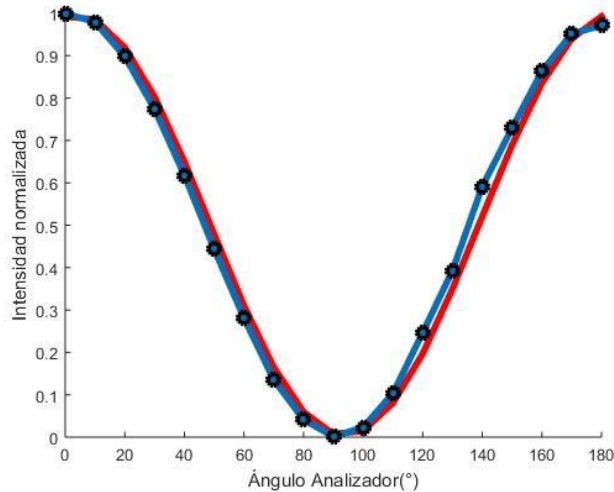
donde σ_1 y σ_2 son las incertidumbres estimadas para los parámetros S_1 y S_2 . De acuerdo a la ecuación (31), la incertidumbre crecerá de forma ilimitada cuando los parámetros S_1 y S_2 tiendan al valor cero, tal como se aprecia para los primeros niveles de gris de las gráficas experimentales S_1 y S_2 mostradas en la parte izquierda de la figura 26. Por lo tanto, la determinación precisa de ϕ_{eq} para los primeros niveles de grises requiere otro método.

Para hallar el valor preciso de ϕ_{eq} en los primeros niveles de gris se ilumina la TN-LCD con luz polarizada linealmente en la dirección del eje x del sistema de referencia propio del cristal y en consecuencia la correspondiente intensidad normalizada viene dada por [17],:

$$T = \begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} (E_x^* \quad E_y^*) = \cos^2 \delta_{eq} \cos^2(\xi + \phi_{eq}) + \sin^2 \delta_{eq} \cos^2(\xi - \phi_{eq}), \quad (32)$$

donde ξ es el ángulo que el eje de transmisión del analizador forma con el eje director molecular a la entrada de la TN-LCD. De la ecuación (32) es posible determinar el valor de ϕ_{eq} y δ_{eq} mediante un ajuste no lineal de los valores experimentales de $T(\xi)$. Por tal razón, se realiza el montaje de laboratorio mostrado en la figura 17, manteniendo fija la orientación del primer polarizador para garantizar la onda electromagnética linealmente polarizada incidente sobre la TN-LCD, y variando el ángulo del analizador entre 0° y 180° en intervalos de 10° . La figura 27 muestra los resultados experimentales de la transmisión de la TN-LCD para el nivel de gris $g = 0$, junto con la curva obtenida a partir del ajuste no lineal. De esta curva es obtenido los valores de giro efectivo ($\phi_{eq} = 12^\circ$) y retardo equivalente de ($\delta_{eq} = 16,0360^\circ$). Siguiendo un proceso análogo son obtenidos los demás valores de ϕ_{eq} y δ_{eq} para los seis restantes niveles de gris como se muestra en el anexo D.

Figura 27. Resultados experimentales (línea azul) y ajuste no lineal (curva teórica, línea roja) para hallar ϕ_{eq} y δ_{eq} en el nivel de gris $g = 0$.



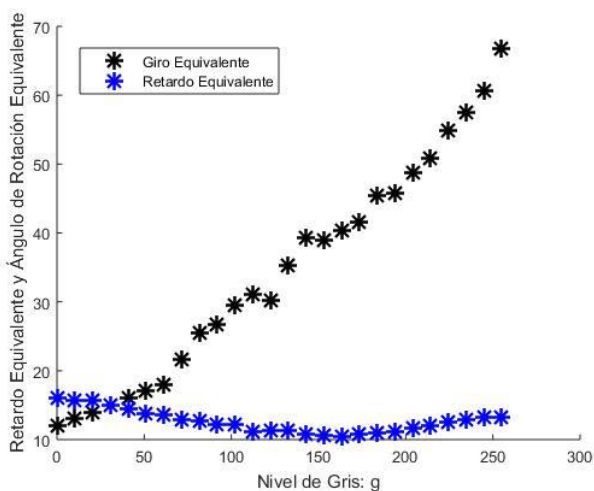
Adicionalmente para contrastar los resultados de los valores de ϕ_{eq} y δ_{eq} utilizando el método de iluminación de la TN-LCD con una onda electromagnética con polarización lineal respecto del método de iluminación de la TN-LCD con una onda electromagnética con polarización circular, fue desplegado un nivel de gris de $g=157$ en la matriz de cristal líquido y tomadas las medidas de intensidad emergentes utilizando como iluminación la onda ($\lambda = 632,8$ [nm]) polarizada linealmente. Los resultados son también mostrados en el anexo E. En este resultado se muestra que los valores encontrados para ϕ_{eq} y δ_{eq} por ambos métodos son muy similares. No obstante, vale la pena señalar que el método de iluminar la TN-LCD para encontrar el giro efectivo y el retardo equivalente para una diferencia de potencial es muy tedioso, respecto del método de los parámetros de Stokes.

Finalmente la Figura 28 muestra los respectivos datos experimentales para los retardos equivalentes (azul) y giros equivalentes (negro) en función del nivel de gris usado o lo que es lo mismo, el voltaje aplicado. De estos datos se puede observar

que la TN-LCD presenta un mayor comportamiento como rotor que como retardador. Es decir nuestra TN-LCD Sony LCX038ARA tiende más a rotar el estado de polarización de la onda de entrada que a adicionar un valor de fase adicional en el frente de onda que incide sobre ella.

El giro de las moléculas tiende a aumentar al incrementar el nivel de gris mientras que el retardo tiende a decrecer presentando su valor mínimo en $g = 163$.

Figura 28. Resultados experimentales finales de ϕ_{eq} y δ_{eq} en función del nivel de gris aplicado sobre la TN-LCD.



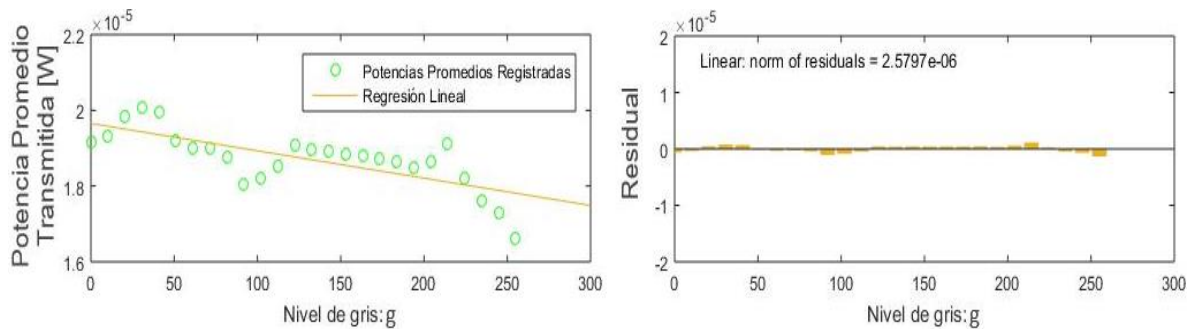
3.4 AJUSTE, CONTRASTE Y BRILLO DE LA TN-LCD SONY

Con los parámetros ϕ_{eq} y δ_{eq} , obtenidos en la TN-LCD para el régimen acoplado en amplitud con un voltaje aplicado sobre la matriz. El último paso para la caracterización de la TN-LCD en intensidad consiste en encontrar los valores

contraste y brillo de la matriz sobre los cuales se obtiene la mejor respuesta lineal entre la intensidad transmitida por matriz a $\lambda = 632,8$ [nm] y los niveles de gris desplegados sobre ésta, a valores fijos de contraste y brillo.

Teniendo en cuenta que la tarjeta de desarrollo de nuestra TN-LCD Sony modelo LCX083ARA presenta una falla en el potenciómetro que regula las variaciones de voltaje y mide el valor de contraste, entonces el valor contraste fue fijado en el valor máximo de voltaje debido a que éste valor debería mejorar el contraste de acuerdo a la potencia de la onda incidente sobre la matriz. Por lo tanto se procedió a realizar el ajuste del brillo donde nuestra TN-LCD opere de la manera más lineal posible. Luego de fijar 11 valores de brillo entre $1,283[V]$ – $1,432[V]$ y desplegar para cada uno de estos valores una serie de 26 imágenes de niveles de gris entre $g=0$ y $g=255$ en intervalos de 5, entonces son obtenidas 11 gráficas experimentales de intensidad versus niveles de gris. Del conjunto de gráficas obtenidas entre la intensidad versus niveles de gris es escogida la mostrada en la figura 29, ya que esta gráfica manifiesta la mejor linealidad con un valor de brillo fijo de $1,298 [V]$.

Figura 29. Distribución experimental de la curva de brillo (1,298 [V]) para la operación de la LCD. Potencia promedio versus niveles de gris y barras de residuales.



4. APLICACIÓN DE UNA MATRIZ DE CRISTAL LÍQUIDO EN LAS COMUNICACIONES.

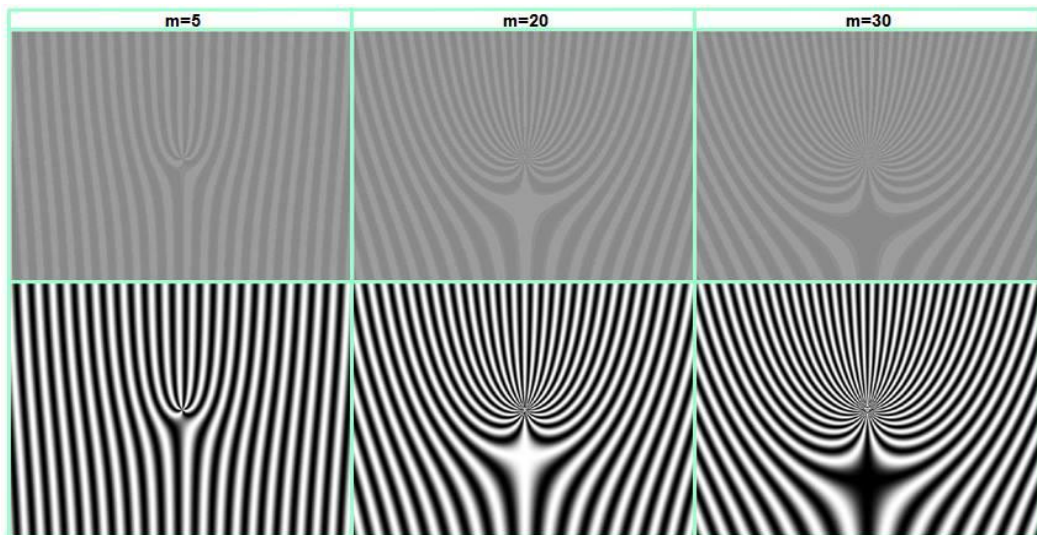
En el anterior capítulo se describió detalladamente los resultados obtenidos para la caracterización de la TN-LCD Sony modelo LCX038ARA en el régimen acoplado en amplitud. De ésta manera se encontraron los valores de los parámetros, birrefringencia, ángulo del eje molecular director y ángulo de giro de la TN-LCD, cuando la matriz se encuentra apagada. También se determinó la curva experimental característica entre el retardo equivalente y el giro efectivo en función del nivel de gris, cuando la TN-LCD se encuentra sometida a un voltaje.

En este capítulo utilizando los resultados de caracterización mencionados anteriormente para la TN-LCD Sony LCX038ARA, se amplia y verifica experimentalmente el modelo de arquitectura optoelectrónica de codificación de datos usando haces luminosos con momento angular orbital generados a través de hologramas computarizados desplegados sobre la TN-LCD Sony LCX038ARA, de un dato en 3 bits a un dato en 5 bits [20, 23]. De manera que el capítulo ha sido estructurado en dos secciones principales. La sección 4.1 muestra los hologramas computarizados utilizados en este trabajo para generación de haces con momento angular orbital y la sección 4.2 describe detalladamente el sistema optoelectrónico sencillo ampliado para la codificación de información usando el momento angular orbital de una onda electromagnética con $\lambda = 632,8$ [nm].

4.1 GENERACIÓN DE HOLOGRAMAS COMPUTARIZADOS EN FORMA DE TENEDOR.

En la sección 2.4 se describió la forma y función de transmitancia de los hologramas usados para generar ondas electromagnéticas con carga topológica bien definida m [67]. Partiendo de los resultados experimentales de caracterización de nuestra TN-LCD Sony fueron generados utilizando Matlab mascarar holográficas en amplitud con los tres niveles de grises que minimizan el retardo inherente producido por la matriz, es decir los niveles $g = 153$, $g = 163$ y $g = 173$. La primera fila de la figura 30 muestra tres hologramas computarizados con los niveles de gris anteriormente mencionados y valores de cargas topológicas $m = 5, 20, 30$; mientras la segunda fila de la misma figura muestra los resultados obtenidos utilizados los niveles de gris de 0-255 e iguales valores de carga topológica.

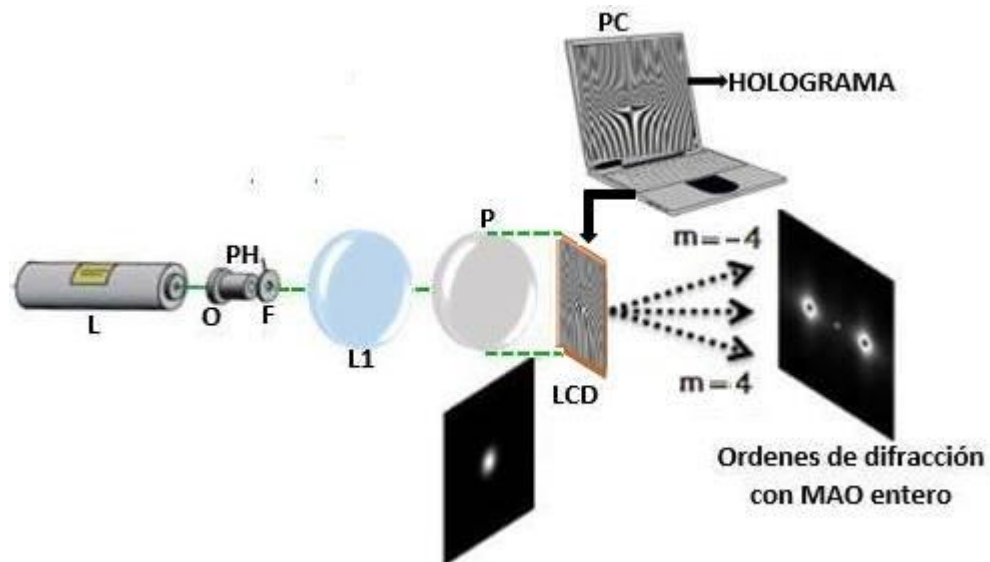
Figura 30. Hologramas generados por Matlab® para las cargas topológicas de izquierda a derecha $m=5$, 20 y $m=30$. (Primera fila con niveles de grises $g = 153$, $g = 163$ y $g = 173$. Segunda Fila con niveles de grises de 0-255).



4.2 PRODUCCIÓN OPTOELECTRÓNICA DE HACES CON MOMENTO ANGULAR ORBITAL UTILIZANDO HOLOGRAMAS COMPUTARIZADOS.

Para generar los haces con momento angular orbital (MAO) se iluminó con $\lambda = 632,8$ [nm] al holograma mejorado utilizando los tres niveles de gris mencionados en la sección anterior, tal como se muestra en el arreglo experimental de la figura 31.

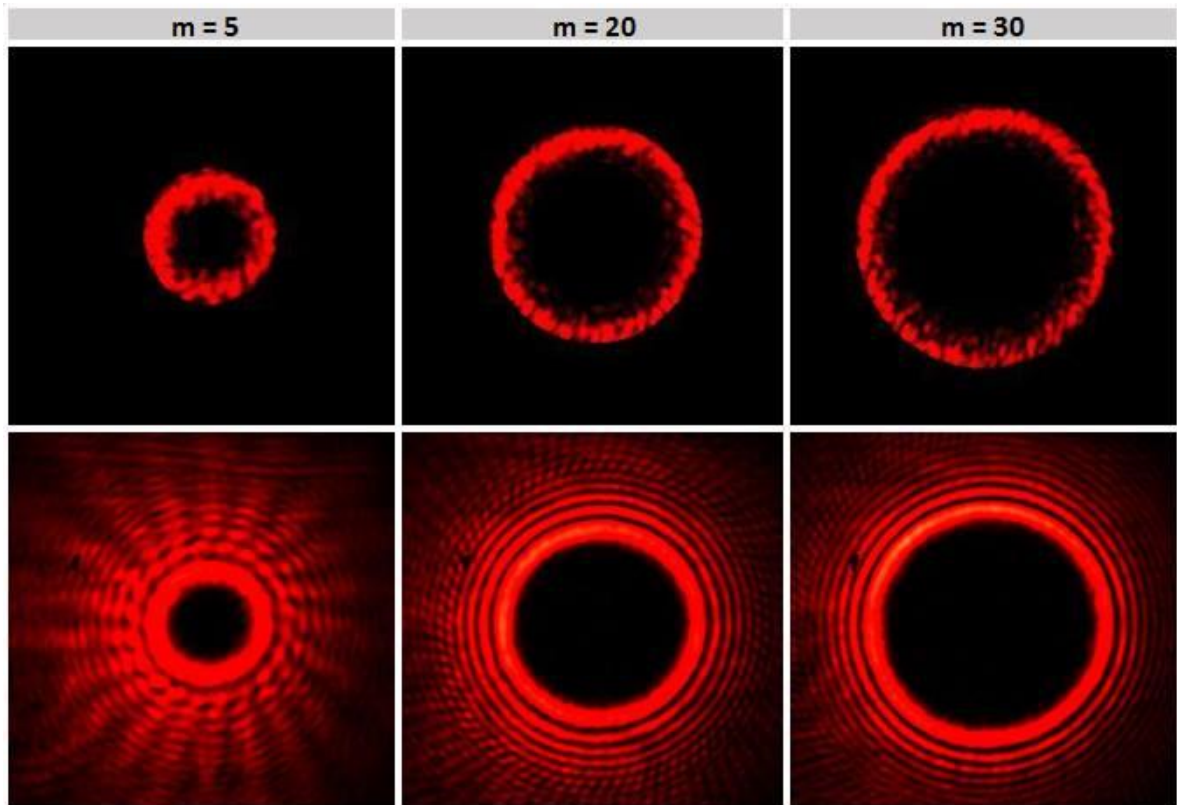
Figura 31. Generador optoelectrónico de haces con momento angular orbital. L, láser; O, objetivo; PH, pinhole; F1, apertura; L1, lente colimadora; P, polarizador; LCD, dispositivo de cristal líquido o modulador espacial. Fuente [17- 23], modificado Autor.



La primera fila de la figura 32 muestra los resultados experimentales obtenidos para la generación de haces con momento angular orbital con cargas topológicas $m=5$, 20, 30. En ésta fila se puede observar la formación de una dona sin anillos rodeando

al máximo central. Si se utilizan hologramas con niveles de gris de 0-255 y los valores de cargas topológicas $m=5, 20, 30$, entonces la dona central tiene anillos secundarios como se aprecia en la segunda fila de la figura 32.

Figura 32. Resultados experimentales obtenidos para la generación de haces con momento angular orbital para las cargas topológicas de izquierda a derecha $m=5, 20$ y $m=30$. (Primera fila con niveles de gris $g=153, g=163$ y $g=173$. Segunda Fila con niveles de grises de 0-255).



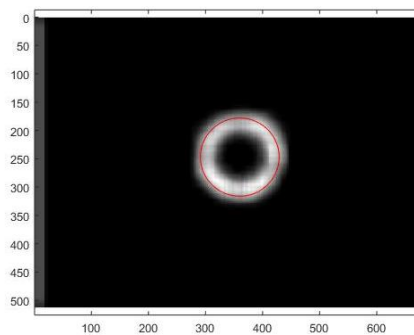
Lo anterior implica que el holograma mejorado con los niveles de gris $g=153, g=163$ y $g=173$ (parte superior figura 30), generan haces de momento angular orbital de tipo vórtice óptico (parte superior figura 31). En el anexo F se muestra la colección de vórtices ópticos obtenidos utilizando los hologramas mejorados con los niveles

de gris $g = 153$, $g = 163$ y $g = 173$ desplegados sobre la TN-LCD Sony para valores de carga topológica desde $m=0$ a $m=40$.

4.3 SISTEMA OPTOELECTRÓNICO SENCILLO PARA LA CODIFICACIÓN DE DATOS SOBRE EL MOMENTO ANGULAR ORBITAL DE LA LUZ.

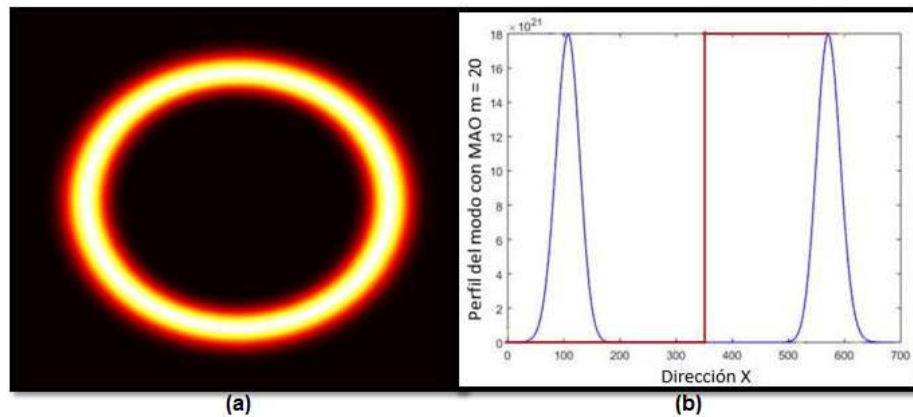
Basados en la producción de los vórtices ópticos puros descritos en la sección anterior se establece una base de codificación optoelectrónica que nos permite colocar un conjunto discreto de datos (hasta cinco bits) provenientes de un PC sobre los haces con MAO mencionados (vórtices ópticos). No obstante para la codificación de información sobre los vórtices ópticos experimentales se estableció como criterio geométrico aquellos cuyo perfil de intensidad transversal fuera el más similar al obtenido para el mismo vórtice óptico teórico con igual carga topológica. Para llevar a cabo este último requisito fue utilizado un procesamiento de imágenes con el propósito de encontrar el centro de masa de cada vórtice con carga topológica definida y trazar su radio promedio en píxeles (promedio entre el radio interno y radio externo). La figura 33 muestra el radio promedio trazado para el vórtice óptico con carga topológica $m=20$.

Figura 33. Radio promedio de la intensidad del modo experimental con MAO $m=20$.



Por otro lado el radio teórico de cada vórtice analítico fue hallado utilizando el perfil transversal de intensidad de cada distribución vórtica. La parte izquierda de la figura 34 muestra la distribución de intensidad de un vórtice óptico analítico con carga topológica $m=20$ junto a su correspondiente perfil transversal como se observa en la parte derecha de la misma figura. De esta manera el radio teórico será el número de píxeles desde el centro hasta cualquiera de los dos máximos laterales.

Figura 34. a) Distribución de intensidad de un vórtice óptico analítico con carga topológica $m=20$. b) Perfil de la simulación teórica de la intensidad y radio del modo teórico con MAO $m=20$.



Las columnas 2 y 3 de la Tabla 4 muestran los valores de radios teóricos y experimentales en píxeles calculados usando los métodos antes descritos para los diferentes valores de carga topológica entre $m=0$ y $m=40$, respectivamente. En la columna 4 de dicha tabla se incluye el porcentaje de error para los radios. Éste porcentaje de error no supera el 11% para los valores de carga topológica entre $m=17$ y $m=40$. Por tal razón los 23 vórtices ópticos entre $m=17$ y $m=40$ pueden ser considerados como una base fidedigna para codificación de datos. Sin embargo, con el fin de no desperdiciar los datos entre $m=0$ y $m=16$ fue asumido como criterio

para este último rango la escogencia de solo los valores impares. Por tal razón el número completo de vórtices ópticos para codificación se amplió a 32.

Tabla 4. Resultados de los radios promedio experimentales y teóricos. Cálculo de la desviación entre el valor medido y el valor teórico.

CARGAS	RADIO TEÓRICO	RADIO EXPERIMENTAL	PORCENTAJE DE ERROR
40	91,12	90	1,23
39	89,76	88	1,96
38	88,74	87	1,96
37	87,38	86	1,58
36	86,36	85	1,57
35	85,34	84	1,57
34	83,98	83	1,167
33	82,62	82	0,75
32	81,26	81	0,33
31	79,90	80	0,13
30	78,88	79	0,15
29	77,52	78	0,62
28	76,16	77	1,10
27	74,80	76	1,60
26	73,44	75	2,12
25	72,08	74	2,66
24	70,38	73	3,72
23	69,36	72	3,81
22	67,66	71	4,94
21	65,96	70	6,12
20	64,26	69	7,38
19	62,56	68	8,70
18	61,20	67	9,48
17	59,50	66	10,92
16	57,46	65	13,12
15	55,76	64	14,78
14	53,72	63	17,27
13	51,68	62	19,97
12	49,64	61	22,88
11	47,60	60	26,05

10	45,56	59	29,50
9	43,18	58	34,32
8	40,80	57	39,71
7	38,08	56	47,06
6	35,36	55	55,54
5	32,30	54	67,18
4	28,90	53	83,39
3	25,16	52	106,68
2	20,40	51	150,00
1	14,28	50	250,14
0	43,87	48	9,41

Con los 32 vórtices ópticos con los valores bien definidos de cargas topológicas fue creado un algoritmo binario sencillo de codificación de 5 bits($2^5 = 32$). La tabla 5 muestra la asignación del alfabeto sobre los MAO seleccionados teniendo en cuenta los anteriores criterios.

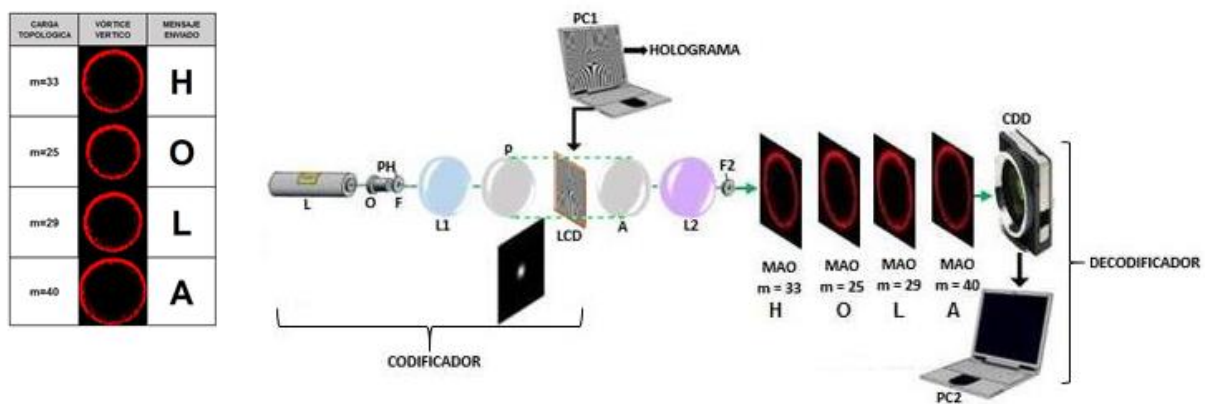
Tabla 5. Asignación del alfabeto sobre los momentos angulares orbitales.

ALFABETO ASIGNADO	MODO 1	ALFABETO ASIGNADO2	MODO 13
A	40	Ñ	26
B	39	O	25
C	38	P	24
D	37	Q	23
E	36	R	22
F	35	S	21
G	34	T	20
H	33	U	19
I	32	V	18
J	31	W	15
K	30	X	11
L	29	Y	7
M	28	Z	3
N	27	—	—

Finalmente, la figura 35 muestra la estructura del codificador propuesto. En ésta figura puede observarse como una onda ilumina distintos hologramas desplegados

cada uno sobre nuestra TN-LCD a un tiempo mínimo entre ellos de aproximadamente $1/60$ [s]. Estos hologramas corresponden a cada una de las 32 máscaras holográficas necesarias para generar los 32 vórtices ópticos seleccionados. De ésta manera, puede utilizarse para discriminar el dato codificado transferido sobre el espacio libre que actúa como canal, un sistema de adquisición de imágenes compuesto por una cámara CCD monocromática Edmund-Optics [68], que puede situarse a una distancia mínima de 38,5 centímetros del codificador y ser conectada a un PC (Véase Figura 35), cuyo software instalado permita sensor y almacenar la cantidad de información transferida sobre las configuraciones espaciales de luz en cuestión [23]. Debe señalarse que por debajo de esta distancia debido a los efectos propios de la difracción del haz deben utilizarse otras imágenes experimentales para calcular lo radios de los vórtices experimentales y teóricos.

Figura 35. Montaje experimental para la transferencia de datos codificados sobre el MAO entero definido. L, láser; O, objetivo; PH, pinhole; F1, apertura; L1, lente colimadora; P, polarizador; LCD, dispositivo de cristal líquido o modulador espacial; A, analizador; L2, lente corregida de Fourier; F2, otra apertura y CCD, cámara monocromática. Fuente [17, 23], modificado Autor.



5. CONCLUSIONES Y OBSERVACIONES.

- Para caracterizar el comportamiento de una TN-LCD sin diferencia de potencial aplicado y encontrar el valor en magnitud y dirección de los parámetros ángulo de giro molecular (\emptyset), ángulo del eje molecular (Ψ_D) y birrefringencia (β), se utiliza el método de Soutar y Lu. Ahora bien, para encontrar los signos de los parámetros \emptyset y Ψ_D es utilizado el método de los parámetros de Stokes.
- El único parámetro que puede considerarse constante cuando a una TN-LCD se le aplica una diferencia de potencial es el ángulo del eje molecular de la cara de entrada Ψ_D , ya que en la construcción de la matriz las moléculas en la cara de entrada son insertadas sobre placas transparentes con acanaladuras en la dirección de Ψ_D .
- Una TN-LCD equivale a un sistema de polarización formado únicamente por un retardador lineal seguido de un rotor, de manera que el retardador-rotor posee un claro significado electroóptico por medio del formalismo de la esfera de Poincaré. Al extender éste modelo retardador-rotor cuando la TN-LCD se le aplica una diferencia de potencial, implica determinar los parámetros que caracterizan el sistema equivalente (δ_{eq} y ϕ_{eq}) para cada nivel de gris. El δ_{eq} y el ϕ_{eq} pueden ser estimados al tomar las medida de los parámetros de Stokes utilizando luz polarizada circularmente.
- Al contrastar los resultados de los valores de \emptyset_{eq} y δ_{eq} utilizando el método de iluminación de la TN-LCD con una onda electromagnética con polarización lineal respecto del método de iluminación de la TN-LCD con una onda electromagnética con polarización circular se muestra que los valores encontrados para \emptyset_{eq} y δ_{eq} por ambos métodos son muy similares. No obstante, vale la pena señalar que el método de iluminar la TN-LCD para

encontrar el giro efectivo y retardo equivalente para una diferencia de potencial es muy tedioso, respecto del método de los parámetros de Stokes.

- El momento angular orbital de un haz luminoso está referido a su estructura de fase de campo electromagnético. Haces luminosos con un factor de fase azimutal de $e^{im\theta}$ poseen momento angular bien definido m , siendo m un valor entero. Los haces luminosos con momento angular orbital pueden ser generados utilizando máscaras holográficas con diferentes valores de m . Estos hologramas computarizados se pueden obtener a partir de un patrón holográfico digital en forma de tenedor, el cual consiste de una rejilla holográfica constituida por píxeles, cuya función de transmitancia es la interferencia de una onda plana de referencia y una onda helicoidal objeto (con un término $e^{im\theta}$).
- Para la codificación de información sobre los vórtices ópticos experimentales se estableció como criterio geométrico, aquellos cuyo perfil de intensidad transversal fuera el más similar con un 11% de confiabilidad igual o menor, al obtenido para el mismo vórtice óptico teórico con igual carga topológica lo que permite generar 32 momentos angulares orbitales de interés necesarios para codificar un dato de 5 bits.

6. PRODUCTOS ASOCIADOS.

Los resultados reportados en este trabajo han sido aceptados y presentados en eventos académicos nacionales e internacionales citados a continuación:

1. V CONGRESO NACIONAL DE INGENIERÍA FÍSICA CNIF, llevado a cabo en Medellín, Colombia, septiembre, 2016. Se envió el resumen el cual fue aceptado y se presentó en la modalidad de ponencia oral.

Trabajo: C. J. Cuevas Cely, C. H. Acevedo y Y. Torres Moreno, “Caracterización global de la modulación en el régimen acoplado en amplitud de una matriz de cristal líquido por transmisión LCX038ARA”.

Producto: En espera de la fecha para IOP conference series Proceedings.

2. II CONGRESO COLOMBIANO DE ELECTROQUÍMICA Y 2° SIMPOSIO EN NANOCIENCIA Y NANOTECNOLOGÍA, llevado a cabo en Bucaramanga, Colombia, Octubre, 2016. Se envió el resumen el cual fue aceptado y se presentó el póster relacionado en la figura 36.

Trabajo: C. J. Cuevas Cely, C. H. Acevedo y Y. Torres Moreno, “Global characterization of a nematic Liquid crystal display LCX038ARA using the retarder-rotor model in the modulation amplitude regime-couple without applied voltage”.

Producto: Artículo actualmente sometido para IOP conference series proceedings.

Global characterization of a nematic liquid crystal display LCX038ARA using the retarder-rotor model in the modulation amplitude regime-coupled without applied voltage.

C J Cuevas Cely¹, Cristian H. Acevedo¹ and Y Torres Moreno¹

¹*GOTS, Optics & Signal Processing Group Physics School Sciences Faculty, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, Colombia.*

E-mail: cuevasjennifer07@gmail.com

Abstract. In this work we showed experimental and theoretical results of the characterization of a nematic liquid-crystal spatial light modulator Sony model LCX038ARA for the parameters angle of molecular rotation, the birefringence and the angle of the molecular axis, using the retarder-rotor model without electric field applied in the amplitude regime-coupled.

3. IX IBEROAMERICAN MEETING ON OPTICS AND XII IBEROAMERICAN MEETING ON OPTICS, LASERS AND APPLICATIONS (RIAO / OPTILAS), que se llevará a cabo en la ciudad de Pucón, Región de la Araucanía, Chile, en el mes de Noviembre. Se envió el resumen el cual fue aceptado y se presentará en la modalidad de ponencia oral.

Trabajo: C. J. Cuevas Cely, C. H. Acevedo y Y. Torres Moreno, "Modeling of an optoelectronic system for data coding using orbital angular momentum of light".

Además, actualmente se trabaja en el borrador de un artículo que incluya todos los resultados experimentales y analíticos mencionados en el presente trabajo para ser sometido a una revista homologada por Colciencias.

Figura 36. Póster presentado en el Congreso: II CCEQ y 2°SNN 2016, Octubre de 2016, Bucaramanga, Colombia.



II CCEQ
2° SNN

CARACTERIZACIÓN GLOBAL DE LA MODULACIÓN EN EL RÉGIMEN ACOPLADO EN AMPLITUD DE UNA MATRIZ DE CRISTAL LÍQUIDO POR TRANSMISIÓN LCX038ARA MEDIANTE EL MODELO RETARDADOR-ROTOR SIN VOLTAJE APLICADO.

Cindy Jennifer Cuevas Cely*, Cristian Acevedo, Yezid Torres Moreno.

Universidad Industrial de Santander, Carrera 27 Calle 9, Bucaramanga, Santander, Colombia

Grupo de Óptica y Tratamiento de Señales

*cuevasjennifer07@gmail.com



II CCEQ
2° SNN

II Congreso Colombiano de Electroquímica
2° Simposio en Nanociencia y Nanotecnología

Del 4 al 7
octubre 2016

Bucaramanga
Sede Bucaramanga/Universidad Industrial de Santander

RESUMEN

Una matriz de cristal líquido MCL es un dispositivo que utiliza una sustancia que se encuentra entre un estado líquido y sólido, manifestando las propiedades de ambos. Debido a esta característica, una de las aplicaciones principales de los MCL es su uso como modulador espacial de luz MSL. La mayoría de los MSL son de tipo nemático y sus propiedades pueden ser explicadas utilizando la óptica, la electrónica y la ciencia de los materiales. De acuerdo con la estructura helicoidal de cada MSL, pueden existir ligeras diferencias entre una misma referencia en los parámetros como son el ángulo de giro molecular, la birrefringencia y el ángulo del eje molecular. En el presente trabajo se muestran los resultados experimentales y teóricos de la caracterización de una TNLCD por transmisión Sony LCX038ARA para los parámetros ángulo de giro molecular, la birrefringencia y el ángulo del eje molecular, utilizando el modelo retardador-rotor y el método de Soutar y Lu para una diferencia de potencial cero.

Donde:

$$X = \cos\gamma$$

$$Y = \left(\frac{\beta}{\gamma}\right) \sin\gamma$$

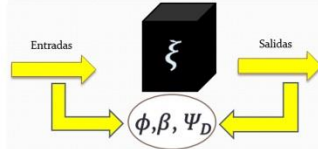
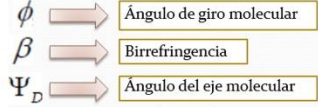
$$Z = \left(\frac{\theta}{\gamma}\right) \sin\gamma$$

$$\gamma = \sqrt{\theta^2 + \beta^2}$$

$$2\beta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_e - n_o)d$$

RESULTADOS TEÓRICOS-EXPERIMENTALES SOUTAR-LU

ENCONTRANDO PARÁMETROS EN EL MODO DE AMPLITUD



MÉTODO DE SOUTAR-LU

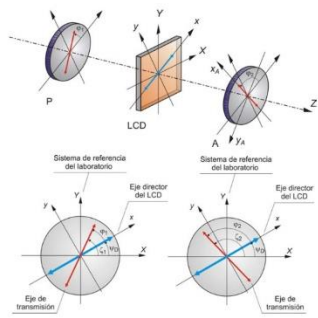


Figura 1. Diagrama de los sistemas de referencia y ángulos involucrados en el método de Soutar y Lu. En la parte inferior izquierda se ha detallado el diagrama de ángulos para el polarizador y en la parte inferior derecha el diagrama de ángulos para el analizador. Fuente[1].

Ecuacon Configuración Paralela Tp

$$T_p = [X\cos\theta + Z\sin\theta]^2 + [Y\cos(2\zeta_1 - \theta - 2\Psi_D)]^2$$

$$= \left[\cos\gamma\cos\theta + \frac{\theta}{\gamma}\sin\gamma\cos\theta \right]^2 + \left[\frac{\beta}{\gamma}\sin\gamma\cos(2\zeta_1 - \theta - 2\Psi_D) \right]^2$$

Ecuacon Configuración Cruzada Tc

$$T_c = [-X\sin\theta + Z\cos\theta]^2 + [Y\sin(2\zeta_1 - \theta - 2\Psi_D)]^2$$

$$= \left[-\cos\gamma\sin\theta + \frac{\theta}{\gamma}\sin\gamma\sin\theta \right]^2 + \left[\frac{\beta}{\gamma}\sin\gamma\sin(2\zeta_1 - \theta - 2\Psi_D) \right]^2$$

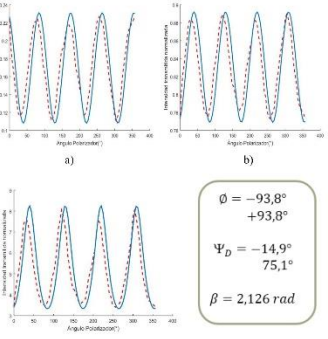


Figura 2. Curvas experimentales y teóricas obtenidas para a) la configuración paralela, b) la configuración cruzada y c) la razón entre la configuración cruzada y la configuración paralela.

MÉTODO DE LOS PARÁMETROS DE STOKES

Ecuaciones de los Parámetros de Stokes

$$S_0 = I^2 + Y^2 + Z^2 = 1$$

$$S_1 = (X^2 - Z^2)\cos[2(\theta + \zeta_1)] + 2YZ\sin[2(\theta + \zeta_1)] + Y^2\cos[2(\theta + 2\Psi_D - \zeta_1)]$$

$$S_2 = (X^2 - Z^2)\sin[2(\theta + \zeta_1)] - 2YZ\cos[2(\theta + \zeta_1)] + Y^2\sin[2(\theta + 2\Psi_D - \zeta_1)]$$

$$S_3 = -2Y(Z\cos[2(\Psi_D - \zeta_1)] + X\sin[2(\Psi_D - \zeta_1)])$$

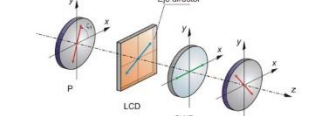


Figura 3. Montaje experimental para la medida de los parámetros de Stokes. La lámina QWP se emplea en la medida de S3. Fuente[1].

RESULTADOS TEÓRICOS-EXPERIMENTALES STOKES

Entonces:

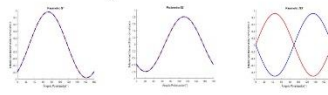
$$\Psi_D = -14,9^\circ + \frac{\pi}{2}$$


Figura 4. Curvas experimentales y teóricas obtenidas para los parámetros de Stokes al sumar $\pi/2$ a $-14,9^\circ$.

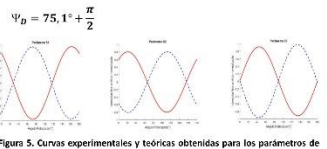


Figura 5. Curvas experimentales y teóricas obtenidas para los parámetros de Stokes al sumar $\pi/2$ a $-75,1^\circ$.

Luego:

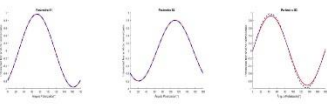
$$\phi = -93,8^\circ$$


Figura 6. Curvas experimentales y teóricas obtenidas para los parámetros de Stokes con ángulo de giro $-93,8^\circ$.

$\phi = +93,8^\circ$

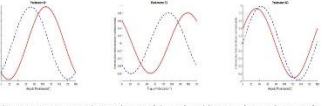


Figura 7. Curvas experimentales y teóricas obtenidas para los parámetros de Stokes con ángulo de giro $93,8^\circ$.

RESULTADOS FINALES

$$\phi = +93,8^\circ$$

$$\Psi_D = -14,9^\circ$$

$$\beta = 2,126 \text{ rad}$$

CONCLUSIONES

Con este trabajo se define una novedosa estrategia para dar solución a la ambigüedades presentes en el método de Soutar-Lu, por medio de la utilización del modelo retardador-rotor a través del uso de los parámetros de Stokes. Obteniendo así una única respuesta para los parámetros de Stokes sin la aplicación de un voltaje en la matriz de cristal líquido por transmisión LCX038ARA.

AGRADECIMIENTOS

La investigación fue apoyada por la Universidad Industrial de Santander. También se ofrece sus respectivos agradecimientos a Colciencias (Proyecto N° 8816 del 2012. Dispositivos Ópticos de alta dimensionalidad basados en QKT).

REFERENCIAS

[1] V. R. Durán, "Optimización del Funcionamiento de un Modulador Espacial de Luz de Cristal Líquido Mediante el Modelo Retardador-Rotor. Aplicaciones en Óptica Adaptativa." Universidad de Valencia, 2015.

[2] J. M. Vilardey, "Static and dynamic amplitude modulation of light in a twisted nematic liquid crystal display." Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng., vol. 8785, no. December, p. 10, 2013.

[3] K. Lu, "Determination of the physical properties of an arbitrary twisted-nematic liquid crystal cell." Opt. Eng., vol. 33, no. 8, p. 2704, 1994.



II CCEQ
2° SNN

II Congreso Colombiano de Electroquímica
2° Simposio en Nanociencia y Nanotecnología



II CCEQ
2° SNN



Universidad Industrial de Santander



UIS



GOIS
GRUPO DE ÓPTICA Y TRATAMIENTO DE SEÑALES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Fujitsu, "Fundamentals of Liquid Crystal Displays – How They Work and What They", 2006.
- [2] V. Moosavi and H. Little, «Communications system including units with lcd optical transmitters/ receivers and related methods». Estados Unidos Patente 11/128.604, 18 Noviembre 2006.
- [3] X.C. Zheng and Y.X. Xie, «Design of a System for the Serial Communication and LCD Between the Microcontroller and DSP,» *Computer Engineering & Science*, Vol. 6, p. 39, 2011.
- [4] H. Yang, A. Zhou, Y. Luo and M. Chen , «Design of the LCD Display in Real-Time Networks Communication Based on Embeded System,» *Computer & Digital Engineering*, 2010.
- [5] J. SHI, «A study of platform EMI from LCD panels-impact on wireless, root causes and mitigation methods,» *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*, pp. 626-631, 2006.
- [6] J. Rodríguez, L. Romero and D. L. Andrews, «Optical binding: potential energy landscapes and QED,» *Integrated Optoelectronic Devices and International Society for Optics and Photonics*, pp. 69050H, 7pp., 2008.
- [7] A. Kumar et Al., «Hybrid opto-electric manipulation in microfluidics—opportunities and challenges,» *Lab on a Chip*, Vol. 11, pp. 2135-2148, 2011.
- [8] L. Romero, J. Rodríguez and D. L. Andrews, «Optically induced multi-particle structures: multi-dimensional energy landscapes,» *Photonics Europe. International Society for Optics and Photonics*, pp. 69880L, 6pp., 2008.

- [9] J. Song et Al., «10.3: Invited Paper: High Mobility Oxide TFTs for Future LCD Applications,» *Blackwell Publishing Ltd In SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2013.
- [10] C. L. Lin et Al., «Highly reliable integrated gate driver circuit for large TFT-LCD applications,» *IEEE Electron Device Letters*, Vol. 5, pp. 679-681, 2012.
- [11] C. Zafra, «Caracterización, Modelado Eléctrico y Desarrollo de Nuevas Aplicaciones de Dispositivos Basados en Cristales Líquidos,» Universidad Carlos III de Madrid, Madrid, 2009.
- [12] E. Martín B., «Correlador óptico para el reconocimiento de objetos basado en las propiedades de modulación de los dispositivos de cristal líquido,» Universidad de Barcelona, Barcelona, 1998.
- [13] H. K. Liu and T. H. Chao, «Liquid Crystals Television Spatial Light Modulators,» *Appl. Opt.*, pp. 4772–4780, 1989.
- [14] J. M. Vilardy, «Static and dynamic amplitude modulation of light in a twisted nematic liquid crystal display,» *Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng.*, Vol. 8785, 10pp., 2013.
- [15] H. Fernández V., «Estudio y optimización del almacenamiento de información en una memoria holográfica,» Universidad de Alicante, Alicante, 2008.
- [16] K. Lu and C. Soutar, «Determination of the physical properties of an arbitrary twisted-nematic liquid crystal cell,» *Opt. Eng.*, Vol. 33, N° 8, p. 2704, 1994.
- [17] V. B. Durán, «Optimización del Funcionamiento de un Modulador Espacial de Luz de Cristal Líquido Mediante el Modelo Retardador-Rotor. Aplicaciones en Óptica Adaptativa,» Universidad de Valencia, Valencia, 2015.
- [18] L. Allen et Al., «OAM Transformation Laguerre-Gaussian Laser Modes,» *The American Physical Society*, Vol. 45, N° 11, p. 8185–8188, 1992.

- [19] C. H. Acevedo Cáceres, «Análisis Teórico-Experimental de un Haz con Momento Angular Orbital Entero y No Entero,» *Tesis de Maestría en Física, Universidad Industrial de Santander*, 2012.
- [20] C. F. Díaz, Y. Torres and C. H. Acevedo, «Superposition of two optical vortices with opposite integer or non-integer orbital angular momentum Superposición de dos vórtices ópticos opuestos con momento angular orbital entero o no entero,» *Ingeniería e Investigación*, Vol. 36, N° 1, pp. 79-84, 2016.
- [21] Q. Xiao et Al., «Generation of photonic orbital angular momentum superposition states using vortex beam emitters with superimposed gratings; Pattern manipulation via on-chip phase modulation between orbital angular momentum beams,» *Phys. Rev. A and Nat. Phys. Appl. Phys. Lett*, Vol. 45, N° 1075, p. 8185, 1992.
- [22] S. Fu et Al., «Measurement of orbital angular momentum spectra of multiplexing optical vortices,» *Opt. Express*, Vol. 24, N° 6, p. 6240–6248, 2016.
- [23] C. F. Díaz Meza, «Modelado de un Sistema Optoelectrónico para la Codificación de Datos a Través del Momento Angular Orbital de la Luz,» Tesis de Maestría en Ingeniería Electrónica, Universidad Industrial de Santander, Bucaramanga, 2012.
- [24] M. Mora González y F. J. Casillas Rodríguez, «Comparación de Métodos de Calibración para Cristales Líquidos (Nemáticos),» 2016.
- [25] M. M. González, «Aplicaciones de cristales líquidos a pruebas ópticas no destructivas,» Universidad de Guanajuato, Guanajuato, 2002.
- [26] P. A. Gil y J. G. Pérez, «El modelo de la esfera de Poincaré: representación de medios materiales,» *Zubía*, p. 9, 1991.
- [27] J. Liu and J. Wang, «Polarization-insensitive PAM-4-carrying free- space orbital angular momentum (OAM) communications,» *Opt. Express*, Vol. 24, N° 4, p. 4258–4269, 2016.

- [28] S. Rout and S. Sonkusale, «Wireless multi-level terahertz amplitude modulator using active metamaterial-based spatial light modulation,» *Opt. Express*, Vol. 24, N° 13, pp. 14618–14631, 2016.
- [29] Y. Zhao and J. Wang, «High-base vector beam encoding/decoding for visible-light communications,» *Opt. Lett.*, Vol. 40, N° 21, pp. 4843–4846, 2015.
- [30] F. Sinjab y et al, «Tissue diagnosis using power-sharing multifocal Raman micro-spectroscopy and auto-fluorescence imaging,» *Biomed. Opt. Express*, vol. 7, n° 8, p. 2993–3006, 2016.
- [31] F. Wang et Al., «Controlled light field concentration through turbid biological membrane for phototherapy,» *Biomed. Opt. Express*, Vol. 6, N° 6, pp. 2237–2245, 2015.
- [32] P. Gao and G. Ulrich Nienhaus, «Confocal laser scanning microscopy with spatiotemporal structured illumination,» *Opt. Lett.*, Vol. 41, N° 6, pp. 1193–1196, 2016.
- [33] N. Matsumoto et Al., «Correction of depth-induced spherical aberration for deep observation using two-photon excitation fluorescence microscopy with spatial light modulator ; Aberration-free three-dimensional multiphoton imaging of neuronal activity at kHz rates,» *Biomed. and Opt. Express*, Vol. 6, N° 7, pp. 2575–2587, 2015.
- [34] R. Kelner and J. Rosen, «Methods of Single-Channel Digital Holography for Three-Dimensional Imaging,» *IEEE Trans. Ind. Informatics*, Vol. 12, N° 1, pp. 220–230, 2015.
- [35] T. Kreis, «3-D Display by Referenceless Phase Holography,» *IEEE Trans. Ind. Informatics*, Vol. 12, N° 2, pp. 685–693, 2016.
- [36] H. K. Liu, J. A. Davis and R. A. Lilly, «Optical-Data-Processing Properties of,» *Optics Letters*, Vol. 10, pp. 635-637, 1985.

- [37] Y. Aguila P., «Nuevas Tecnologías en el Diseño y Construcción de Receptores de Televisión,» Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2015.
- [38] L. D. Waelder,, «T. L. Periféricos, and L. Página, “Tecnología LCD,» Periféricos, 2002.
- [39] R. H. Chen, «Liquid Crystal Displays.,» New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.
- [40] E. Lueder, «Liquid crystal displays,» Second Edition, John Wiley & Sons, Inc, 2010.
- [41] M. Born and E. Wolf, «Principles of Optics,» Oxford: Pergamon, 1991.
- [42] E. Hecht, «Optics,» San Francisco: Pearson International Edition, 2002.
- [43] R. M. A. Azzam y N. M. Bashara, «Ellipsometry and polarized light,» Amsterdam: Elsevier, 1987.
- [44] H. Hurwitz y R. C. Jones, «A New Calculus for the Treatment of Optical,» *Journal of the Optical*, Vol. 31, pp. 493-499, 1941.
- [45] J. E. Bigelow y R. A. Kashnow, «Poincaré Sphere Analysis of Liquid- Crystal Optics,» *Applied Optics*, Vol. 16, pp. 2090-2096, 1977.
- [46] M. Johnson, «Poincaré Sphere Representation of Birefringent Networks,» *Applied Optics*, Vol. 20, pp. 2075-2080, 1981.
- [47] H. G. Jerrard, «Transmission of Light through Birefringent and Optically Active Media - the Poincaré Sphere,» *Journal of the Optical Society of America*, Vol. 44, pp. 634-640, 1954.
- [48] V. Duran y et al, «Equivalent retarderrotator approach to on-state twisted nematic liquid crystal displays,» *Journal of Applied Physics*, Vol. 99, pp. 113101-6, 2006.
- [49] W. H. Hayt Jr y . J. A. Buck, «Teoría electromagnética,» México: McGraw Hill, 2006.

- [50] J. D. Jackson, «Classical Electrodynamics,» New York: John Wiley & Sons Inc., 1999.
- [51] M. C. España, «Comunicaciones ópticas, Conceptos esenciales y resolución de ejercicios,» Madrid: Díaz de Santos, 2005.
- [52] R. E. Beth, «Mechanical Detection and Measurement of the Angular Momentum of Light,» *Phys Rev*, Vol. 50, pp. 115-125, 1936.
- [53] L. Allen et Al, «Intrinsic and Extrinsic Nature of the Orbital Angular Momentum of a Light Beam,» *Phys. Rev. Lett*, Vol. 88, nº 5, pp. 3601-3605, 2002.
- [54] M. J. Padgett and A. M. Yao, «Orbital angular momentum: origins, behavior and applications 3,» *Advances in Optics and Photonics*, Vol. 2, pp. 161-204, 2012.
- [55] N. Anaya Carvajal, «Generación de vórtices ópticos perfectos con momento angular orbital mediante hologramas computarizados,» Bucaramanga: Universidad industrial de Santander, 2016.
- [56] L. Janicijevic and S. Topuzoski, «Fresnel and Fraunhofer diffraction of a Gaussian laser beam by fork-shaped gratings,» *JOSA A*, Vol. 25, nº 11, pp. 2659-2669, 2008.
- [57] N. R. Heckenberg et Al, «Laser beams with phase singularities,» *Optics and Quantum electronics*, Vol. 24, nº 9, pp. S951-S962, 1992.
- [58] E. Santamato, «Photon orbital angular momentum: Problems and,» *Fortschr. Phys*, Vol. 52, nº 11-12, pp. 1141-1153, 2004.
- [59] CRL Opto, *XGA1 Datasheet. CRL Opto doc # 409/0207/01A*, CRL Opto Limited, 2002.
- [60] Sony Corporation, *LCX038ARA Datasheet*, Sony Corporation, s.f..
- [61] DHgate. LCD LCX038ARA7. 5 de Mayo de 2015. <http://www.dhgate.com/product/lcx038ara7-lcx038ara-lcx038a-lcx038/245947751.html> (último acceso: 22 de Octubre de 2016).

- [62] O. J. Tijero Rojas, «*Desarrollo de un prototipo optoelectrónico para evaluación en la verificación de huellas dactilares,*» Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2008.
- [63] A. Sarma, «New Experimental Methods for Determining Optical Parameters,» *Journal of Physics D-Applied Physics*, Vol. 10, pp. 2019-2030, 1977.
- [64] C. Brosseau, «*Fundamentals of Polarized Light. A Statistical Optics Approach,*» NewYork: John Wiley & Sons, 1998.
- [65] R. Guenther, «Modern Optics,» John Wiley & Sons, New York, 1990.
- [66] P. R. Bevington and D. K. Robinson, «Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences,» New York: Mc Graw-Hill, 1992.
- [67] B. Brown y A. Lohmann, «Computer-generated bynary holograms,» *IBM Journal of Research and Development* , Vol. 13, nº 2, pp. 160-168, 1969.
- [68] Edmund-Optics and uEye, «*USB 2.0 Cameras*», *User's manual*, 2008.

BIBLIOGRAFÍA

Acevedo, C. «Análisis Teórico-Experimental de un Haz con Momento Angular Orbital Entero y No Entero.» Tesis de Maestría en Física, Universidad Industrial de Santander, 2012.

Aguila P., Y. Nuevas Tecnologías en el Diseño y Construcción de Receptores de Televisión. Universidad Central “Marta Abreu” de Las Villas, 2015.

Allen, L., y et al. «Intrinsic and Extrinsic Nature of the Orbital Angular Momentum of a Light Beam. » Phys. Rev. Lett 88, nº 5 (2002): 3601-3605.

Allen, L., y et al. «OAM Transformation Laguerre-Gaussian Laser Modes. » The American Physical Society 45, nº 11 (1992): 8185–8188.

Anaya Carvajal, Nelson. Generación de vórtices ópticos perfectos con momento angular orbital mediante hologramas computarizados. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander, 2016.

Azzam, R. M. A., y N. M. Bashara. «Ellipsometry and polarized light. » Amsterdam: Elsevier, 1987.

Beth, R. E. «Mechanical Detection and Measurement of the Angular Momentum of Light. » Phys Rev 50 (1936): 115-125.

Bevington, P. R., y D. K. Robinson. Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences. New York: Mc Graw-Hill, 1992.

Bigelow, J. E., y R. A. Kashnow. «Poincare Sphere Analysis of Liquid- Crystal Optics. » Applied Optics 16 (1977): 2090-2096.

Born, M., y E. Wolf. Principles of Optics. Oxford: Pergamon, 1991.

Brosseau, C. «Fundamentals of Polarized Light. A Statistical Optics Approach. » NewYork: John Wiley & Sons, 1998.

Brown, B., y A. Lohmann. «Computer-generated binary holograms. » IBM Journal of Research and Development 13, nº 2 (1969): 160-168.

C. F. Díaz, Y. Torres, and C. H. Acevedo. «Superposition of two optical vortices with opposite integer or non-integer orbital angular momentum Superposición de dos vórtices ópticos opuestos con momento angular orbital entero o no entero.» Ingeniería e Investigación 36, nº 1 (2016): 79-84.

Chen, R. H. Liquid Crystal Displays. New Jersey: John Wiley & Sons, 2011.

CRL Opto. «XGA1 Datasheet. CRL Opto doc # 409/0207/01A.» CRL Opto Limited, 2002.

D. Waelder, L. T. L. Periféricos, and L. Páquina, "Tecnología LCD. Periféricos, 2002.

DHgate, «LCD LCX038ARA7,» [Base de datos en línea]: <http://www.dhgate.com/product/lcx038ara7-lcx038ara-lcx038a-lcx038/245947751.html>. 5 Mayo 2015.

Díaz, C. Modelado de un Sistema Optoelectrónico para la Codificación de Datos a Través del Momento Angular Orbital de la Luz. Bucaramanga: Tesis de Maestría en Ingeniería Electrónica, Universidad Industrial de Santander, 2012.

Duran, V., y et al. «Equivalent retarder-rotator approach to on-state twisted nematic liquid crystal displays. » Journal of Applied Physics 99 (2006): 113101-6.

Durán, V. B. Optimización del Funcionamiento de un Modulador Espacial de Luz de Cristal Líquido Mediante el Modelo Retardador-Rotor. Aplicaciones en Óptica Adaptativa. Valencia: Universidad de Valencia, 2015.

Edmund-Optics and uEye. «“USB 2.0 Cameras”, User’s manual.» 2008.

Fernández V., H. Estudio y optimización del almacenamiento de información en una memoria holográfica. Alicante: Universidad de Alicante, 2008.

Fu, S., y et al. «Measurement of orbital angular momentum spectra of multiplexing optical vortices.» Opt. Express 24, nº 6 (2016): 6240–6248.

Fujitsu. “Fundamentals of Liquid Crystal Displays – How They Work and What They”. 2006.

Gao, P., y G. Ulrich Nienhaus. «Confocal laser scanning microscopy with spatiotemporal structured illumination. » Opt. Lett 41, nº 6 (2016): 1193–1196.

Gil, P. A., y J. G. Pérez. «El modelo de la esfera de Poincaré: representación de medios materiales.» Zubía, 1991: 9.

González, M. M. Aplicaciones de cristales líquidos a pruebas ópticas no destructivas. Guanajuato: Universidad de Guanajuato, 2002.

Guenther, R., Modern Optics. New York: John Wiley & Sons, 1990.

- Hayt Jr, W. H., y J. A. Buck. Teoría electromagnética. México: McGraw Hill, 2006.
- Hecht, E. Optics. San Francisco: Pearson International Edition, 2002.
- Heckenberg, N. R., y et al. «Laser beams with phase singularities. » Optics and Quantum electronics 24, nº 9 (1992): S951-S962.
- Hurwitz, H., y R. C. Jones. «A New Calculus for the Treatment of Optical. » Journal of the Optical 31 (1941): 493-499.
- Jackson, J. D. Classical Electrodynamics. New York: John Wiley & Sons Inc., 1999.
- Janicijevic, L., y S. Topuzoski. «Fresnel and Franhoufer diffraction of a Gaussian laser beam by fork-shaped gratings. » JOSA A 25, nº 11 (2008): 2659-2669.
- Jerrard, H. G. «Transmission of Light through Birefringent and Optically Active Media - the Poincare Sphere. » Journal of the Optical Society of America 44 (1954): 634-640.
- Johnson, M. «Poincare Sphere Representation of Birefringent Networks. » Applied Optics 20 (1981): 2075-2080.
- Kelner, R., y J. Rosen. «Methods of Single-Channel Digital Holography for Three-Dimensional Imaging. » IEEE Trans. Ind. Informatics 12, nº 1 (2015): 220–230.
- Kreis, T. «3-D Display by Referenceless Phase Holography. » IEEE Trans. Ind. Informatics 12, nº 2 (2016): 685–693.
- Kumar, Alok, y et al. «Hybrid opto-electric manipulation in microfluidics—opportunities and challenges. » Lab on a Chip 11 (2011): 2135-2148.

Lin, C. L., y et al. «Highly reliable integrated gate driver circuit for large TFT-LCD applications. » IEEE Electron Device Letters 5 (2012): 679-681.

Liu, H. K., J. A. Davis, y R. A. Lilly. «Optical-Data-Processing Properties of. » Optics Letters 10 (1985): 635-637.

Liu, H. K., y T. H. Chao. «Liquid Crystals Television Spatial Light Modulators. » appl. opt, 1989: 4772–4780.

Liu, J., y J. Wang. «Polarization-insensitive PAM-4-carrying free-space orbital angular momentum (OAM) communications. » Opt. Express 24, nº 4 (2016): 4258–4269.

Lu, K., y C. Soutar. «Determination of the physical properties of an arbitrary twisted-nematic liquid crystal cell. » Opt. Eng. 33, nº 8 (1994): 2704.

Lueder, E. Liquid crystal displays, Second Edi. John Wiley & Sons, Inc, 2010.

M. C. España. Comunicaciones ópticas, Conceptos esenciales y resolución de ejercicios. Madrid: Díaz de Santos, 2005.

Martín B., E. Correlador óptico para el reconocimiento de objetos basado en las propiedades de modulación de los dispositivos de cristal líquido. Barcelona: Universidad de Barcelona, 1998.

Matsumoto, N., y et al. «Correction of depth-induced spherical aberration for deep observation using two-photon excitation fluorescence microscopy with spatial light modulator " Aberration-free three-dimensional multiphoton imaging of neuronal activity at kHz rates.» Biomed. Opt. Express 6, nº 7 (2015): 2575–2587.

Moosavi, V., y H. Little. Communications system including units with lcd optical transmitters/ receivers and related methods. Estados Unidos Patente 11/128.604. 18 de Noviembre de 2006.

Mora González, M., y F. J. Casillas Rodríguez. «Comparación de Métodos de Calibración para Cristales Líquidos (Nemáticos).» 2016.

Padgett, M. J., y A. M. Yao. «Orbital angular momentum: origins, behavior and applications 3. » Advances in Optics and Photonics 2 (2012): 161-204.

Rodríguez, Justo, Luciana Romero, y David L. Andrews. «Optical binding: potential energy landscapes and QED. » Integrated Optoelectronic Devices and International Society for Optics and Photonics, 2008: 69050H-69050H-7.

Romero, Luciana, Justo Rodríguez, y David L. Andrews. «Optically induced multi-particle structures: multi-dimensional energy landscapes. » En Photonics Europe. International Society for Optics and Photonics, 2008: 69880L-69880L-6.

Rout, S., y S. Sonkusale. «Wireless multi-level terahertz amplitude modulator using active metamaterial-based spatial light modulation. » Opt. Express 24, nº 13 (2016): 14618–14631.

Santamato, E. «Photon orbital angular momentum: Problems and. » Fortschr. Phys 52, nº 11-12 (2004): 1141-1153.

Sarma, A. «New Experimental Methods for Determining Optical Parameters. » Journal of Physics D-Applied Physics 10 (1977): 2019-2030.

SHI, Jin. «A study of platform EMI from LCD panels-impact on wireless, root causes and mitigation methods. » IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility, 2006: 626-631.

Sinjab, F., y et al. «Tissue diagnosis using power-sharing multifocal Raman micro-spectroscopy and auto-fluorescence imaging. » Biomed. Opt. Express 7, nº 8 (2016): 2993–3006.

Song, J., y et al. «10.3: Invited Paper: High Mobility Oxide TFTs for Future LCD Applications. » Blackwell Publishing Ltd In SID Symposium Digest of Technical Papers, 2013.

Sony Corporation. «LCX038ARA Datasheet. » Sony Corporation, s.f.

Tíjaro Rojas, Omar Javier. «Desarrollo de un prototipo optoelectrónico para evaluación en la verificación de huellas dactilares.» Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, 2008.

Vilardy, J. M. «Static and dynamic amplitude modulation of light in a twisted nematic liquid crystal display. » Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng. 8785 (2013): 10.

Wang, F., y et al. «Controlled light field concentration through turbid biological membrane for phototherapy. » Biomed. Opt. Express 6, nº 6 (2015): 2237–2245.

Xiao, Q., y et al. «Generation of photonic orbital angular momentum superposition states using vortex beam emitters with superimposed gratings " Pattern manipulation via on-chip phase modulation between orbital angular momentum beams.» Phys. Rev. A Nat. Phys. Appl. Phys. Lett 45, nº 1075 (1992): 8185.

Yang, Haiqing, Andong Zhou, Yong Luo, y Mu Chen. «Design of the LCD Display in Real-Time Networks Communication Based on Embeded System. » Computer & Digital Engineering, 2010.

Zafra, C. Caracterización, Modelado Eléctrico y Desarrollo de Nuevas Aplicaciones de Dispositivos Basados en Cristales Líquidos. Madrid: Universidad Carlos III de Madrid, 2009.

Zhao, Y., y J. Wang. «High-base vector beam encoding/decoding for visible-light communications. » Opt. Lett. 40, nº 21 (2015): 4843–4846.

Zheng, Xiu-cong, y Yun-xiang Xie. «Design of a System for the Serial Communication and LCD Between the Microcontroller and DSP. » Computer Engineering & Science 6 (2011): 39.

ANEXOS

ANEXO A. DEDUCCIÓN DE LA TRANSMITANCIA DE LA CONFIGURACIÓN PERPENDICULAR Y PARALELA.

Una expresión para el campo de salida E_{out} de una TN-LCD utilizando la matriz de Jones viene dada por:

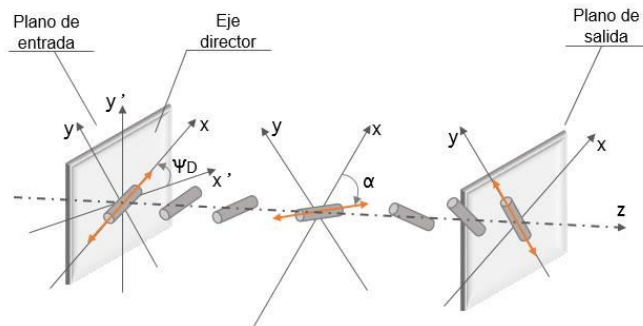
$$E_{out} = ME_{in}, \quad (33)$$

donde E_{in} es el campo de entrada que incide en la TN-LCD y M es:

$$M = \exp(-i\beta)R(-\phi) \begin{pmatrix} X - iY & Z \\ -Z & X + iY \end{pmatrix}. \quad (34)$$

Para deducir la ecuación (34) que describe el comportamiento de una TN-LCD en ausencia de voltaje externo son usados los diferentes sistemas de referencia mostrados en la figura 37, donde α es el ángulo que, forman las moléculas con respecto al ángulo del eje molecular Ψ_D , en cada capa de la matriz.

Figura 37. Esquema de los diferentes sistemas de referencia usados en la deducción de la matriz de Jones en ausencia de voltaje externo para un TN-LCD.



De la figura 37 se toma como sistema de referencia las coordenadas (x, y), debido a que éste pasa por el eje molecular a la entrada de la TN-LCD (Ψ_D), e iluminando con un haz plano monocromático emitido por el láser el sistema polarizador-LCD-analizador; incide sobre la TN-LCD una luz linealmente polarizada en dirección φ_1 (Véase Figura 5), donde se obtiene que el vector de Jones normalizado es:

$$E_{in} = \begin{pmatrix} \cos \varphi_1 \\ \sin \varphi_1 \end{pmatrix}. \quad (35)$$

Sea E_{LCD} el estado de polarización de la luz a la salida del LCD y aplicando las ecuaciones (34) y (35), se obtiene que:

$$E_{LCD} = \exp(-i\beta) \mathbf{R}(-\varnothing) \begin{pmatrix} X - iY & Z \\ -Z & X + iY \end{pmatrix} E_{in} \quad (36)$$

$$E_{LCD} = \exp(-i\beta) \begin{pmatrix} X \cos(\varphi_1 + \varnothing) - iY \cos(\varphi_1 - \varnothing) + Z \sin(\varphi_1 + \varnothing) \\ X \cos(\varphi_1 + \varnothing) - iY \cos(\varphi_1 - \varnothing) + Z \sin(\varphi_1 + \varnothing) \end{pmatrix}. \quad (37)$$

El estado de polarización que emerge del analizador con respecto al sistema de referencia (x_A, y_A) propio del analizador, es el vector E_{out} y viene dado por

$$E_{out} = \mathbf{P} \mathbf{R}(\varphi_2) E_{LCD} \quad (38)$$

$$E_{out} = \exp(-i\beta) \begin{pmatrix} X \cos(\varphi_1 - \varphi_2 + \varnothing) - iY \cos(\varphi_1 + \varphi_2 - \varnothing) + Z \sin(\varphi_1 - \varphi_2 + \varnothing) \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (39)$$

donde P representa la matriz de un polarizador lineal ideal con su eje de transmisión orientado en la dirección del eje " x_A ".

$$P = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (40)$$

La intensidad asociada con el estado E_{out} , de acuerdo con el cálculo de Jones, es:

$$T = E_{out}^\dagger E_{out}, \quad (41)$$

donde el símbolo † denota el vector hermítico. Empleando la ecuación anterior se obtiene que

$$T = [X\cos(\varphi_1 - \varphi_2 + \emptyset) + Z\cos(\varphi_1 - \varphi_2 + \emptyset)]^2 + [Y\sin(\varphi_1 + \varphi_2 - \emptyset)]^2. \quad (42)$$

Se puede reescribir T empleando los ángulos ζ_1 y ζ_2 , los cuales miden la inclinación presente en los ejes de transmisión del polarizador y analizador con respecto al sistema de referencia de Laboratorio (X,Y). La relación que presentan estos ángulos es

$$\zeta_1 = \Psi_D + \varphi_1, \quad (43)$$

y

$$\zeta_2 = \Psi_D + \varphi_2. \quad (44)$$

Despejando φ_1 y φ_2 de las anteriores ecuaciones y al sustituirlas en la ecuación (42), se obtiene

$$T = [X\cos(\zeta_1 - \zeta_2 + \emptyset) + Z\cos(\zeta_1 - \zeta_2 + \emptyset)]^2 + [Y\sin(\zeta_1 - \zeta_2 + \emptyset - 2\Psi_D)]^2 \quad (45)$$

Considerando las dos configuraciones particulares del sistema óptico. Sí el polarizador y el analizador tienen sus ejes de transmisión en paralelo, es decir, $\zeta_1 = \zeta_2$ (configuración paralela). La nueva expresión de T es

$$T_p = [X\cos\emptyset + Z\sin\emptyset]^2 + [Y\cos(2\zeta_1 - \emptyset - 2\Psi_D)]^2 \quad (46)$$

$$T_p = \left[\cos\gamma\cos\emptyset + \frac{\emptyset}{\gamma}\sin\gamma\cos\emptyset \right]^2 + \left[\frac{\beta}{\gamma}\sin\gamma\cos(2\zeta_1 - \emptyset - 2\Psi_D) \right]^2 \quad (47)$$

Pero sí el polarizador y analizador se orientan formando un ángulo de 90° entre sus respectivos ejes de transmisión, es decir, configuración cruzada $\zeta_1 = \zeta_2 + \pi/2$. La nueva intensidad transmitida es

$$T_c = [-X\sin\emptyset + Z\cos\emptyset]^2 + [Y\sin(2\zeta_1 - \emptyset - 2\Psi_D)]^2 \quad (48)$$

$$T_c = \left[-\cos\gamma\sin\emptyset + \frac{\emptyset}{\gamma}\sin\gamma\cos\emptyset \right]^2 + \left[\frac{\beta}{\gamma}\sin\gamma\sin(2\zeta_1 - \emptyset - 2\Psi_D) \right]^2 \quad (49)$$

ANEXO B. DEDUCCIÓN DEL MODELO RETARDADOR-ROTOR PARA UNA TN-LCD CON VOLTAJE APLICADO.

Es posible descomponer cualquier matriz como:

$$M = HU, \text{ donde } H^\dagger = H \text{ y } U^\dagger = U^{-1}. \quad (50)$$

De acuerdo a los valores propios de la ecuación (50) se puede encontrar que U tiene dos valores propios $\lambda_+ = \exp(i\varphi/2)$ y $\lambda_- = \exp(-i\varphi/2)$, que son factores puros de fase y afectan la polarización de una onda. H Tiene dos valores propios reales y positivos μ_+ y μ_- , que pueden ser asociados con la absorción. De acuerdo a lo mencionado anteriormente, se puede considerar a M como la asociación de dos sistemas de polarización, U que es de carácter puramente *retardador* y H que es de carácter puramente *polarizante*.

Para un sistema puramente retardador, U equivale a una lámina retardadora y un rotor. U , en la forma general se puede escribir como:

$$U = \begin{pmatrix} a & b \\ -b^* & a^* \end{pmatrix}, \text{ donde } a^*a + b^*b = 1. \quad (51)$$

Otra forma general de expresar la matriz U es:

$$U(\xi, \zeta, \eta) = \begin{pmatrix} \exp(-i\xi) \cos \eta & \exp(i\zeta) \sin \eta \\ -\exp(-i\zeta) \sin \eta & \exp(i\xi) \cos \eta \end{pmatrix}, \quad (52)$$

donde ξ, ζ, η son cantidades reales.

Por otra parte la matriz del retardador $WP(2\delta, \theta)$ y la matriz del rotor $R(\omega)$ se pueden considerar como:

$$WP(2\delta, \theta) = \begin{pmatrix} \cos - i\cos(2\theta)\sin\delta & -i\sin\delta\sin(2\theta) \\ -i\sin\delta\sin(2\theta) & \cos\delta + i\cos(2\theta)\sin\delta \end{pmatrix}. \quad (53)$$

θ Es el ángulo que se forma entre el eje lento de la lámina retardadora y un eje de referencia arbitrario 'x'. 2δ es la fase relativa entre los estados rápido y lento de la lámina.

$$\mathbf{R}(\omega) = \begin{pmatrix} \cos\omega & \sin\omega \\ -\sin\omega & \cos\omega \end{pmatrix}, \quad (54)$$

donde ω es el ángulo en que gira el plano de polarización.

El retardador- rotor es asociado a:

$$V(2\delta, \theta, \omega) = \mathbf{R}(\omega)WP(2\delta, \theta). \quad (55)$$

De forma que $U = V$. Para establecer la igualdad entre estas matrices se emplea la descomposición de los elementos del grupo SU(2) en la base de las matrices de Pauli.

Sea $M \in S(2)$, entonces:

$$M = e_0 I + i(e_1 \sigma_1 + e_2 \sigma_2 + e_3 \sigma_3), \quad (56)$$

Donde I es la matriz identidad, $\{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3\}$ son las matrices de Pauli y $\{e_1, e_2, e_3\}$ son los parámetros de Euler.

Con la descomposición dada por la ecuación (56), la matriz $U(\xi, \zeta, \eta)$ queda en la forma:

$$U(\xi, \zeta, \eta) = \cos\xi \cos\eta I + i(\sin\xi \sin\eta \sigma_1 + \cos\xi \sin\eta \sigma_2 - \sin\xi \cos\eta \sigma_3). \quad (57)$$

Empleando algunas identidades trigonométricas básicas, se obtiene para la matriz V la expresión:

$$V(2\delta, \theta, \omega) = \cos\omega \cos\delta I + i[\sin(\omega - 2\theta) \sin\delta \sigma_1 + \sin\omega \cos\delta \sigma_2 - \cos(\omega - 2\theta) \sin\delta \sigma_3]. \quad (58)$$

Para poder asegurar que $U = V$, se llega al sistema de ecuaciones:

$$\begin{cases} \cos\omega\cos\delta = \cos\xi\cos\eta \\ \sin(\omega - 2\theta)\sin\delta = \sin\xi\sin\eta \\ \sin\omega\cos\delta = \cos\xi\sin\eta \\ \cos(\omega - 2\theta)\sin\delta = \sin\xi\cos\eta \end{cases} \quad (59)$$

Se puede comprobar que una solución del sistema de ecuaciones (59) es:

$$\tan\omega = \frac{\cos\xi}{\cos\xi} \tan\eta, \quad (60)$$

$$\tan(\omega - 2\theta) = \frac{\sin\xi}{\sin\xi} \tan\eta, \quad (61)$$

$$\sin\delta = \frac{\sin\xi\cos\xi}{\cos(\omega - 2\theta)}. \quad (62)$$

Esta solución implica que la matriz de un dispositivo no absorbente expresada en la forma general $U(\xi, \zeta, \eta)$ se puede poner siempre en la forma $V(2\delta, \theta, \omega)$.

Finalmente se obtiene:

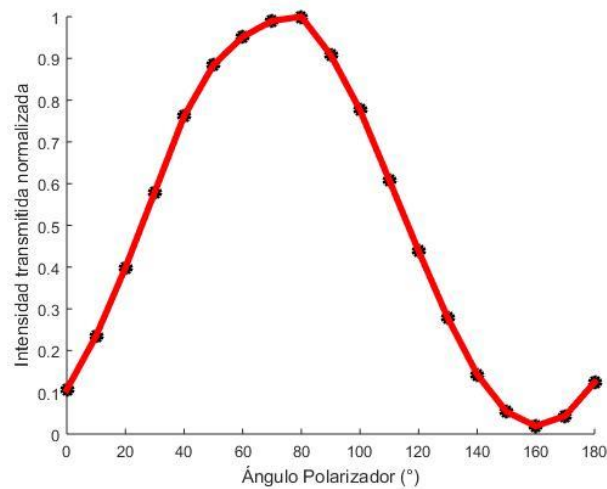
$$\mathbf{M}_{TN-LCD} = \exp(-i\beta)\mathbf{R}(\varnothing_{eq})\mathbf{WP}\left(2\delta_{eq}, \frac{\varnothing + \varnothing_{eq}}{2}\right). \quad (63)$$

Con $\varnothing_{eq} = \varnothing + \omega_{eq}$.

ANEXO C. PROCEDIMIENTO ADICIONAL PARA ENCONTRAR EL SIGNO DEL ÁNGULO DE GIRO.

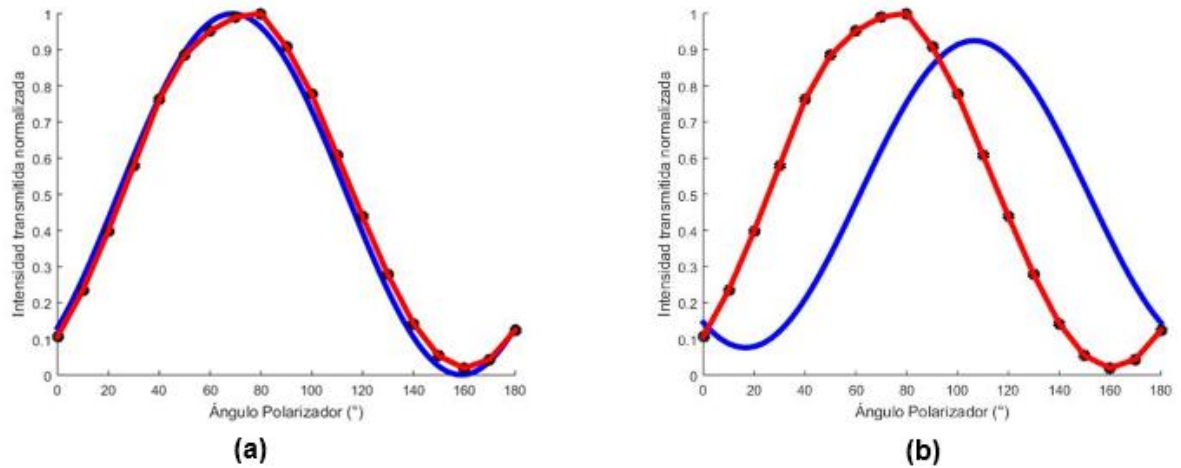
Realizando el procedimiento descrito al final de la sección 3.2 se procede a realizar la curva experimental que se obtiene con los datos registrados en la prueba como se muestra en la figura 38.

Figura 38. Curva experimental para la intensidad asociada al campo de salida de la TN-LCD.



Luego de obtener la curva experimental de la intensidad asociada al campo de salida en la TN-LCD, se procede a comparar este resultado con las curvas teóricas que se generan a partir de la ecuación (13) para los posibles valores del ángulo de giro $93,8^\circ$ y $-93,8^\circ$, como se muestra en la figura 39.

Figura 39. Resultados experimentales (línea roja) de la intensidad de salida de la TN-LCD; y analíticos (línea azul) para los dos posibles valores angulares de giro molecular. a) Valor analítico de $\phi = +93,8^\circ$. b) Valor analítico de $\phi = -93,8^\circ$.



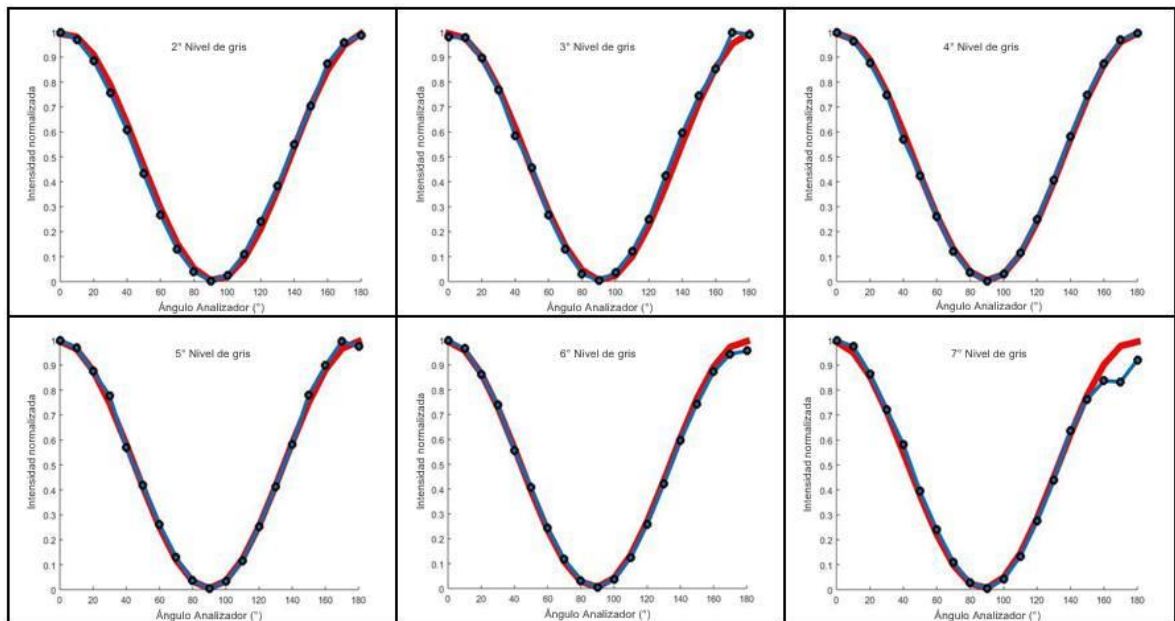
De acuerdo a la figura 39 y según lo mencionado al final de la sección 2.2.1, el signo del ángulo de giro molecular es determinado por la curva teórica que mejor se ajusta a los datos experimentales, por consiguiente el ángulo de giro molecular es $93,8^\circ$.

Este procedimiento a pesar de que no posee ninguna interpretación desde el punto de vista electroóptico, permite dar confirmación al valor que se obtiene mediante el uso de los parámetros de Stokes para la determinación del signo en el ángulo del giro molecular en la matriz Sony modelo LCX08ARA.

ANEXO D. VALORES DE ϕ_{eq} Y δ_{eq} PARA LOS SEIS RESTANTES NIVELES DE GRIS.

Se procede a seguir el procedimiento descrito en esta sección 3.3 para encontrar los valores de ϕ_{eq} y δ_{eq} para los seis restantes niveles de gris. En la figura 40 se muestran los resultados experimentales de la transmisión de la TN-LCD para el nivel de gris 2,3,4,5,6 y 7 respectivamente, junto con la curva obtenida a partir del ajuste no lineal.

Figura 40. Resultados experimentales (línea azul) y ajuste no lineal (curva teórica, línea roja) para hallar ϕ_{eq} y δ_{eq} en los niveles de gris (de izquierda a derecha) 2, 3, 4, 5, y 7, respectivamente



De las curvas de la figura 40 se obtienen los valores de ϕ_{eq} y δ_{eq} , los cuales se evidencian en la Tabla 6.

Tabla 6 Valores de ϕ_{eq} y δ_{eq} para los seis restantes niveles de gris.

Nivel de Gris	$\phi_{eq} [^\circ]$	$\delta_{eq} [^\circ]$
2	13,04	15,6930
3	14,27	15,6995
4	15,12	15,0218
5	16,07	14,5432
6	17,05	13,7216
7	18,49	13,5001

ANEXO E. COMPARACIÓN DEL RESULTADO DE LOS VALORES DE ϕ_{eq} Y δ_{eq} UTILIZANDO EL MÉTODO DE ILUMINACIÓN DE LA TN-LCD CON UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA CON POLARIZACIÓN LINEAL RESPECTO DEL MÉTODO DE ILUMINACIÓN DE LA TN-LCD CON UNA ONDA ELECTROMAGNÉTICA CON POLARIZACIÓN CIRCULAR PARA UN NIVEL DE GRIS $g = 157$.

Para dar confirmación a los resultados obtenidos de ϕ_{eq} y δ_{eq} utilizando el método de iluminación de la TN-LCD con una onda electromagnética con polarización circular, fue desplegado un nivel de gris de $g = 220$ en la matriz de cristal líquido y tomadas las medidas de intensidad emergentes de la TN-LCD utilizando como iluminación la onda ($\lambda = 632,8$ [nm]) polarizada linealmente. Esto con el propósito de contrastar los resultados de ϕ_{eq} y δ_{eq} que se obtienen en los dos métodos de iluminación de la TN-LCD para un mismo nivel de gris $g = 220$.

Finalmente, la figura 41 muestra los resultados experimentales de la transmisión de la TN-LCD para el nivel de gris $g = 220$, junto con la curva obtenida a partir del ajuste no lineal. De esta curva son obtenidos los valores de giro efectivo ($\phi_{eq} = 36,0098^\circ$) y retardo equivalente ($\delta_{eq} = 11,9360^\circ$).

Para contrastar los valores de ϕ_{eq} y δ_{eq} , se registran en la Tabla 7 los valores obtenidos en cada polarización, con el fin de verificar la similitud de estos resultados.

Figura 41. Resultados experimentales (línea azul) y ajuste no lineal (curva teórica, línea roja) para hallar ϕ_{eq} y δ_{eq} en el nivel de gris $g = 157$.

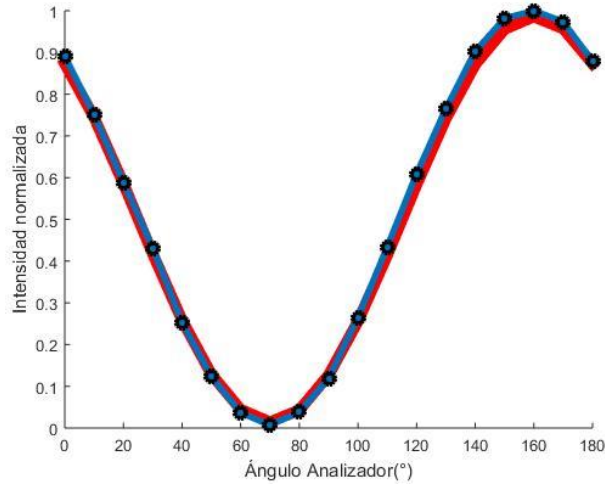


Tabla 7. Valores de ϕ_{eq} y δ_{eq} para el nivel de gris $g = 157$ aplicando polarización lineal y/o circular, respectivamente.

	$\phi_{eq} [^\circ]$	$\delta_{eq} [^\circ]$
Polarización Lineal	38,653	11,9360
Polarización Circular	38,901	11,9314
Porcentaje de Error	0,642	0,039

**ANEXO F. COLECCIÓN DE VÓRTICES ÓPTICOS OBTENIDOS UTILIZANDO
LOS HOLOGRAMAS MEJORADOS CON LOS NIVELES DE GRIS $g = 153$, $g = 163$ y $g = 173$ DESPLEGADOS SOBRE UNA TN-LCD SONY PARA VALORES
DE CARGA TOPOLÓGICA DESDE $m=0$ a $m=40$**

Figura 42. Imágenes experimentales de la difracción en campo lejano para las cargas topológica desde $m=0$ a $m=40$.

